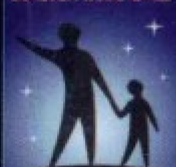




国家级教学团队·科学素质教育丛书

天文学新概论

（第四版）

苏　宜◎编著



科学出版社
www.sciencep.com

国家级教学团队·科学素质教育丛书

丛书特点

◆出色的编撰团队

该套丛书由教育部批准的首批100个国家级教学团队中唯一的文化素质教育类型的教学团队——南开大学“科学素质教育系列公共课教学团队”中多年从事科研和教学的资深老师编写。

◆优秀的教材内容

稳：本套教材均为已出版多次的经典教材的再版，诸位编著者通过长期的教学实践和经验总结，其编写的教材已形成相对稳定的内容体系，便于老师教学和学生学习；

新：随着各个学科的发展，在保持教材内容相对稳定的同时，又能及时对学科前沿的内容进行补充，具有与时俱进的特点。

◆完善的教材配套

单机版电子课件：内容与教材同步，通过图片、案例等形式使学习与实践紧密结合，增强了课堂教学的生动性；

网络版教学课件：在单机版电子课件的基础上，拓展与课程相关的内容，通过网络技术的支持，搭建网络沟通平台，实现对以往教学中教师单向讲授模式的突破，实现了教学的开放性、交互性和资源共享性。

世界科技文化史教程	李建珊
科研方法导论	张伟刚
• 天文学新概论（第四版）	苏　宜
文科天文	苏　宜

本课程立体化教学支持系统包括：

教学光盘

ISBN 978-7-03-025087-2



高等教育出版中心·数理出版分社
联系电话：010-64015178
E-mail：mph@mail.sciencep.com

定 价：40.00元(含光盘)

国家级教学团队·科学素质教育丛书

天文学新概论

（第四版）

苏　宜　编著
苏朝晖　光盘制作

科学出版社
北　京

内 容 简 介

本书是作者在积累多年教学经验的基础上，结合天文学最新进展编写而成。本书是第四版，前三版已得到广大读者的认可。本书可以使读者比较系统地获得关于天体和宇宙的各种知识，科学地认识神秘而和谐的宇宙，了解人类生存的宇宙环境及人类探索宇宙的科学方法、艰辛历程和未来前景，达到开阔视野、启迪人生、提高科学素养和综合知识水平的目的。

本书适合作为高等学校天文选修课的教材，也可供有兴趣的广大读者阅读。

图书在版编目（CIP）数据

天文学新概论/苏宜编著．—4版．—北京：科学出版社，2009
（国家级教学团队·科学素质教育丛书）
ISBN 978-7-03-025087-2

Ⅰ．天…　Ⅱ．苏…　Ⅲ．天文学-概论　Ⅳ．P1

中国版本图书馆CIP数据核字（2009）第127813号

责任编辑：李鹏奇　胡云志／责任校对：宋玲玲
责任印制：张克忠／封面设计：无极书装

科学出版社出版
北京东黄城根北街16号
邮政编码：100717
http://www.sciencep.com
北京市文林印务有限公司印刷
科学出版社发行　各地新华书店经销
*
2009年8月第　一　版　开本：B5（720×1000）
2009年8月第一次印刷　印张：27 1/4
印数：1—4 000　字数：550 000

定价：40.00元（含光盘）

（如有印装质量问题，我社负责调换）



中国天文学会名誉理事长王绶琯院士题词：

探宇宙之无穷　识盈虚之有数

天文学新概论第四版付梓　书赠苏宜同志　2009年　王绶琯

第四版前言

本书从 2000 年 8 月第一版、2002 年 2 月第二版、2005 年 12 月第三版出版以来，已经 7 次印刷。中国天文学会名誉理事长王绶琯院士和前任理事长苏定强院士是我国大型天文望远镜 LAMOST 的概念提出人。本书第三版付梓的时候，82 岁高龄的王绶琯院士曾欣然命笔，为本书题词；第三版出版以后，曾得到苏定强院士的简评：本书的“选材和结构突破了传统的格局，明显地向当代天文学研究前沿倾斜，突出了宇宙学、星系、黑洞、系外行星探测和仪器技术的最新发展等内容，很符合当前国际上天文学研究的重点范围，材料也很新、很全面。本书不仅介绍天文知识的本体，还联系人文思想、文学和哲学方面的话题，行文流畅，文笔优美，是对大学生进行科学素质教育的很好的教材。本书确实非常适合选修天文学通识课的非天文学专业大学生使用，即使是天文学专业的学生，也不妨选作入门教材或重要参考书。”

时隔三年，适逢纪念伽利略用天文望远镜观察星空 400 年的“2009 国际天文年”，本书推出第四版。

去年 11 月 9 日，王绶琯院士以耄耋之年登临河北兴隆燕山深处的国家天文台观测基地，亲见曾倾注心血的 LAMOST 落成并投入工作。我们有幸向王老汇报本书第四版即将付梓的消息，他又重新书写题词上的款识并赐函编著者：“书再版，特致贺。”

第四版的主要变动是：遵从 2006 年国际天文学联合会关于太阳系行星的定义，调整了所有从九大行星改为八大行星的叙述；增加了 3 年来天文学研究的最新进展，包括对行星、矮行星和海外天体的太阳系探测（第 4 章），发现有双脉冲信号的双脉冲星（8.1），发现中子星与中子星碰撞或黑洞吞吃中子星（10.7），发现引力透镜效应产生的爱因斯坦环（10.8），发现宇宙暗物质存在的直接证据，通过引力透镜效应获得宇宙暗物质环和暗物质分布的三维图像（12.8.6），WMAP 五年工作成果和最新的宇宙学重要参数（12.8.6），北落师门 b 等系外行星的最新发现（11.4.1）等。增加篇幅最多的是第 7 章关于天文望远镜和人类探索宇宙新视野的介绍。知识内容方面增加的是：太阳系行星和卫星上的天球坐标系（2.6）；从公历日期计算纪日干支的方法（3.4.4）；球状星团年龄的测定（9.4.4）；红移与距离的关系，如何从宇宙背景辐射测哈勃常数（12.8）等。附录中的大量数据也都更新为最新发布的值。

当然，最显著的变化是出版社的变动和附赠光盘。更换出版社的原因是：编

著者开设的天文学课程所属“南开大学科学素质教育系列公共课教学团队”，由数学学院顾沛教授领衔，2007 年被评为全国首批 100 个国家级教学团队之一。团队所有课程的教材都须由科学出版社统一出版。为此，谨向曾多年良好合作的华中科技大学出版社表示敬意。附赠的光盘收录了 700 余幅精美的彩色图像，大大丰富了原书的黑白图像信息。光盘中所有天体的真实照片都来自世界各大天文望远镜的网站，每张照片上都尽量保存着发布该照片时的来源信息。这些望远镜自身的照片也一一录制在光盘中。这些望远镜代表着当前人类探索宇宙的最高水平。它们提供的信息，使天文学家们更深入地认识了神秘而和谐的宇宙；也使我们普通读者得以赞叹和欣赏天体的宏伟和美丽，同时获得知识的提高和理性的升华。让我们对制造这些望远镜和提供这些照片的专业人士深表感激和尊敬。也感谢采集、编选和技术处理这些照片，最后制成光盘的天津科学技术馆苏朝晖工程师。

书中每一张注有“光盘图”字样的图像都收录在光盘中，图号和图题都一一对应。附录中的大部分内容和全部人名索引也转移到光盘中。

诚挚地感谢王绶琯院士、苏定强院士和曾对本书赐教的国家天文台蒋世仰研究员、南京天文光学技术研究所崔向群所长和西北师范大学刘亚楠副教授。深切缅怀对本书有过指导的已故前北京天文台台长李启斌研究员、首都师范大学马星垣教授。也诚挚地欢迎天文界的专家、学者和每一位读者朋友们对本书不当之处提出宝贵意见。

编著者

2009 年 2 月于南开园



第一版序一

天文学是研究宇宙间天体及其系统的科学。它研究天体的位置、运动、物理状态以及它们的结构和演化。由于所研究的对象在时空尺度上的广延性、物理条件上的多样性和复杂性，天文学永远是人类认识自然和改造自然的一门重要的基础学科。

地球是宇宙中的一颗行星。天文学的研究成果也直接为生活在地球上的人类服务。天文学与其他自然科学，共同促进人类高新技术的发展，改进人类赖以生存的地球环境。天文学的发展还推动着人类认识论和世界观的不断进步。

天文学也是向社会公众传播科学知识、科学思想和科学方法最积极的学科之一，是与愚昧无知、迷信落后作斗争的最有力工具。学习天文学对培养未来一代青、少年强烈的求知欲望、探索精神和科学的思维方法，帮助他们认识人类在自然界中的地位，树立正确的世界观都是极为重要的。

在人们心目中，天文学知识高深难解，像瑰丽的珠宝藏之深山，或像绚丽的鲜花周围荆棘丛生，可望而不可及。本书有一点好处就是使读者避开了数理方面的困难，比较轻松地了解到天文学的基本概念和近代发展，而又不失知识全面、逻辑严谨、深入浅出、条理分明。

今年恰逢我们从大学天文系毕业 40 周年，苏宜是当年班上年龄最小的同学。他在入学之前先于我们认识天上的星座，又在毕业之前先于我们到天文台实习和工作。在经历了一段人生坎坷之后，他于十几年前离开了天文工作岗位，却在即将退休的时候写出了这本《天文学新概论》。以他多年积淀的天文学知识，朴实而优美的文风，娓娓叙述天文学各方面的概要和进展。该书是一本不可多得的天文学基本读物。我愿诚恳地将该书推荐给非天文专业的莘莘学子和广大的爱好天文的读者们。

孙义燧

1998 年 6 月 12 日

第一版序二
——祝贺的话

南开大学没有天文系，但有一位毕业于南京大学天文系并在北京天文台多年从事天文研究的教授苏宜先生。他在南开大学无法专门从事天文研究，但他心不离天文，在南开大学开设“天文学概论”全校公共选修课，支持和指导学生组织“南开大学天文协会”，积极开展天文学推广教育。他授课独具特色，将天文、地文、人文内在地联系起来，使学生既学到丰富的天文知识和科学的思维方法，又学到进步的世界观、人生观和价值观，深受学生欢迎，为南开大学学生的综合素质教育作出了很大贡献。

可以这样说，自从人类产生之后，人类的生存、发展和知识的演进，就与人类对天体和宇宙的探索形成了共根连体的关系。尤其是中华民族的文化，更具有突出的天体和宇宙文化的特征。因此，中华民族对世界天文学的发展作出了卓越的贡献不是偶然的。中华民族素有博大的、活跃的想象力，自古以来就把天、地、人贯通在一起，寻求对万事万物解释的一以贯之的原则，努力建立最有吸引力的宇宙观、世界观、人生观和社会观，以形成推动民族发展的最大的精神凝聚力。比如，中国古人就提出了“则天而行”的社会观。他们认为，父天母地，天地生人。因此，天地之本，即人之本；天地之则，即人之则。天圆地方，圆中规，方中矩，天地的圆方规矩，也就是宇宙万物造化不息的法则。同样，人世间无论是正事、正言、正道、正人，还是修政治民，都要依天理，承天则，都要“德合天地”。中国的古人，正是以这种“则天而行”的世界观和人生观，去解释和论证一切社会现象的。正是因为“日中则移，月满则亏”，故而一切都是“物极必反”；正是因为“道之大原出于天”，故而“天不变，道亦不变”；正是因为“天无二日”，故而“士无二主”；正是因为“皇天不言，以文象设教”，故而要“凡事必咨而后行”；正是因为“天地四时”（春、夏、秋、冬），故而治世就要“庆赏罚刑”，饮食就要有“酸、苦、辣、咸”等等。就连项羽被困垓下时，也把自己的失败说成是“此天之亡我，非战之罪也。”今天，我们对这种“天人合一”、“则天而行”的宇宙观和社会观，不论有多少不同的评断，而这种自然一体和依宇宙客观规律办事的哲理，总是很伟大的。现代哲学家和天文学家们常引德国哲学家康德的名言：“世界上有两件东西能够深深地震撼人们的心灵：一件是我们心中崇高的道德准则；另一件是我们头顶上灿烂的星空。”不知道康德是否知道，远在他之前，中国人早已将二者统一在一起了。中华民族的天文文化是整

个中华民族优秀传统文化的重要组成部分。在当代，天文学和天文文化的发展一日千里，天文文化的教育意义也与日俱增。教育家们越来越清楚地看到，天文学推广教育对提高民族综合素质和创新能力，是极其重要的。

我完全不懂天文学。不过，人们总是对自己不懂的东西更有好奇心，我也是这样。我对天文学、宇宙学和宇航事业也很神往。做为教务长，不但支持和感谢苏宜教授在南开大学开展天文学推广教育，而且每每见到他发表有关天文学的文章和出版天文学方面的著作，也总是由衷地高兴。苏宜教授的新作《天文学新概论》即将出版，他要我为之作序。对于天文学，我是外行，序是作不出的，但是他的新作即将付印的消息，却使我激动不已，于是写了以上几段文字，做为我对苏宜教授的崇敬与祝贺。

车铭洲

1998 年 12 月于南开大学



第一版前言

Zwei Dinge erfuellen das Gemuth mit immer neuer und zunehmender Bewunderung und Erfurcht，je oefter und anhaltender sich die Nachdenkung damit beschaeftigt，der besternte Himmel ueber mir und das moralische Geselz in mir.

——Immanuel Kant

这是德国著名哲学家伊曼努尔·康德在1788年他64岁时发表的名著《实践理性批判》结论中的一段名言，译成中文的意思是：

世界上有两件东西能够深深地震憾人们的心灵，一件是我们心中崇高的道德准则，另一件是我们头顶上灿烂的星空。

岁月流逝已经200多年，当我们今天诵读、品味这段名言的时候，它所深含的人生哲理依旧会在每个人的心目中熠熠生辉。

和浩瀚的宇宙相比，地球是多么渺小，人的一生又何其短暂；但人类存在的价值之一，在于人的智慧代代相传，人类集体的智慧能够探究浩瀚宇宙中的无穷奥秘。人生于世，时时都应意识到我们生活在社会群体中，我们生活在自然怀抱里。当我们与社会中的别人打交道时，崇高的道德准则是必须遵守的；人在自然怀抱里更不能无视天地宇宙之间自然界庄严的规律。仰望星空，无论是几十年前还是几十年后，无论你身在地球上什么地方，灿烂的群星总以它那无比的深邃和静谧，向你展示着神秘而和谐的宇宙图景，使你心驰神往，无限遐思，心灵得到净化。

1997年7月在第二届海峡两岸天文推广教育研讨会上，全国人大常委、中国科学院院士叶叔华先生发表文章说："天文学与其他科学一样不仅是知识的本体，更重要的是一种思维方法。""让天文学从神秘高深的科学殿堂里走出来，成为人们生活中不可缺少的一部分，以达到净化精神、陶冶情操、提升素质的目的。这是历史和社会赋予天文学家、推广教育人士、科普工作者以及所有具有天文知识的人的崇高责任与义务。"

本书雏稿是1993年应南开大学为文理科学生开设《天文学概论》公共选修课之需而编写的。选修课一开就一发而不可收，连续14个学期，听课学生遍及南开大学与天津大学各院系，总人数达5 206人。编写的内容是边教、边学、边改，终于在南开大学教材建设委员会的鼓励与资助之下交付出版。作者虽然早年毕业于大学天文专业，也曾在天文岗位工作多年，但毕竟身已不在天文研究前沿，许多较新的内容只能边教边学，将勤补拙，勉为其难了。书中有不妥之处在

所难免，希望得到天文界的专家、学者及各界人士的批评指正。如果问本书在同类书中有何特点的话，或许可以说，特点在于书中所述多不是本人的研究成果而只能算学习他人之所得，作者更偏向于站在“学”的方面，“业余”的方面，为薄发而厚积，虔诚学习，有所领悟，择其精华而发诸笔端的。作者身处非天文专业而对天文学有所倾心的年轻学子之间，比较了解他们的兴趣与要求，而且所教、所写能够及时地在他们面前得到检验与充实、提高，比较适合他们的口味。

“天文学概论为我们这些好奇的心灵和探求的眼睛推开了一扇展示天文学神秘宝藏的窗户，五彩缤纷的宇宙使我的眼界豁然开朗。”

“美丽、和谐、神奇的宇宙之光，使我得到了一种新的思维方式的启迪，受益无穷”。

“天文学概论课使我的思想驰骋在广阔浩瀚的宇宙之中，让我思索人类的前途，人生的意义。我真是恋恋不舍。”

“天文学知识激励我用前人智慧的结晶武装自己，立志为造福人类而奋斗终生。我觉得比以前更成熟、更有信心、更有力量。这种精神的动力是我最大的收获。”

“学了天文学，我心目中的世界不再是原来那个狭小的空间。灿烂的群星已经震撼了我的心灵，使我更加热爱科学、热爱生活。似乎有点玄乎，但的确我有这种感受。”

……

这些由文、理、工、医各专业学生自觉写出的心声，是对设置这门课程最好的回报，也是对写好这本教材最大的鞭策与鼓舞，作者应该向他们致谢。

本书虽以“新概论”为名，却不敢自诩内容有多新，主要是考虑到以前已经有过一本《天文学概论》（中国人民大学出版社，1987年版）问世，而避重名僭越之嫌。

本书写作以“既说明事理，又提高兴致”为宗旨，力求二者兼顾，使不同专业的学生都能够撷英汲粹，兴趣盎然。少许略微专深一些的内容，用小号字穿插于章节之中，供一部分理科基础较强的学生选读。跳过这些段落，也不影响对全书的连贯理解。希望本书除作为高等学校天文选修课教材之外，也能成为具有中等以上文化水平的读者获取天文知识的有益读物。

中国科学院院士、南京大学研究生院院长、天文学家孙义燧教授和南开大学教务长、法政学院院长、哲学家车铭洲教授分别为本书作序，中国科学院北京天文台的李启斌研究员、林元章研究员对本书写作指导良多，蒋世仰研究员、胡景耀研究员审阅了部分书稿并提出许多指导性的宝贵意见，天津科学技术馆的苏朝晖工程师为本书全部插图付出心血。在此一并表示感谢。

编著者

2000年元月于南开园

第一版后记

本书从起始到甫成，历时五年有余，今天终于写完了最后一个字。在天文工作者的队伍里，我曾经是一名老兵，现在却只是一个新手。十几年前我被调来南开大学图书馆学系从事与天文学关系甚远的大学课程的教学工作，直到 1993 年才开始用业余时间重温天文学的旧业，向非天文专业的学生讲授天文学选修课。在年年超教学工作量的同时着手编写教材。笨鸟先飞、将勤补拙，一章一节，句酌字斟，几易其稿，终致成书。在南开大学教材建设委员会和华中理工大学出版社的大力支持下，特别是在南开大学教务长车铭洲教授的鼓励与支持下，本书即将奉献于读者面前。希望本书能对非学天文专业而选修天文学课程的同学们以及社会各界对天文学有所倾心的朋友们有所帮助，更希望天文界的专家和每一位读者对本书存在的错误和不当之处不吝赐教。

最后，恳请读者允许我表达一点个人的心愿。今年是我大学毕业 40 周年，也是我出生 60 周年，同时还是我的母亲诞辰 100 周年，我的女儿去世 5 周年。我的母亲出身于金陵城外的农民家庭，生育并抚养长大成人的儿女共有 6 人。除姐姐一生执教于山村小学，没有上过大学以外，其余 5 人均受过高等教育，分属文学、医学、工程、地质、天文五个学科，但母亲本人却不识字，而且连个学名都没有。她在户口本上的名字还是在她 63 岁那年迁报户口时，应户籍部门的要求，由我为她老人家取的。母亲生我是在南京大屠杀的战祸声中，举家逃难的路上，可谓是劫后余生。我的女儿苏星玫，不幸于豆蔻年华即罹患不治之症，长期与我相依为命，曾随我住过北京天文台的沙河、兴隆、密云及天津诸工作站。1993 年 9 月我在南开大学开讲全校天文公共选修课。上第三周课的那个晚上，女儿来催促我，时间快到，该去上天文课了。语犹未尽，即不幸摔倒地上，面部受伤，肱骨骨折，两个月后就离开了人世，年仅 33 岁。父母的养育之恩，没齿不忘；女儿的可怜身世，动人哀思。谨以本书献给我的母亲和我的女儿。

苏　宜

1998 年 12 月 30 日深夜于天津南开园

目录

光盘内容



绪 论

遂古之初，谁传道之？
上下未形，何由考之？

圜则九重，孰营度之？
惟兹何功，孰初作之？
斡维焉系？天极焉加？
八柱何当？东南何亏？
九天之际，安放安属？
隅隈多有，谁知其数？
天何所沓？十二焉分？
日月安属？列星安陈？

——屈原，《天问》

0.1 探索宇宙是人类永恒的欲望

我们居住的这颗七分是水三分是陆地的蔚蓝色的星球，是迄今为止宇宙中人类已知唯一有生命存在的星球。以人类为最高层次的生物界相互依存地生活在这颗星球上，组成一个生态平衡系统。根据生物分类学家的统计，现在生活在地球上已经被描述和命名的物种有 170 多万种。根据地质学家和古人类学家的意见，人类是在距今 3 000 万～1 000 万年的时期之内，从猿的系统中分化出来；而真正的人，能制造工具的人形成至今有 100 万～400 万年的历史。

以文字出现为标志的几千年人类文明的发展，特别是现代科学技术的发展，大大改变了人类的生活方式。现代的人类社会比之原始部落已有极大的不同，人类支配着更多的自然财富，生活得更舒适，更追求享受，寿命也更加长久。但人类有赖于自然的最基本的生存条件：空气、阳光、温度、水和食物，以至于人体的自然形态、生理结构、繁殖后代的方式……都没有任何改变。生命或文明存在的条件，并不因为文明的发达程度而有所变化。

地球存在于以日月星辰为伴侣的宇宙环境中。太阳系中唯一的恒星——太阳，在距地球 1.5 亿千米处为我们提供光明、温暖和能源，维持适宜的环境温度；地球的自转和公转决定了昼夜交替、寒来暑往等自然节律；由地球引力场维

系着的大气的存在，以太阳辐射能作动力的水的循环……无一不是所有生命最基本的保障系统。

人有别于其他动物的地方是有思维活动，有认识和改造自然的能力。人的思维活动必然涉及他们所处的环境，包括宇宙环境。那耀眼的太阳、皎洁的月亮、闪烁的恒星、迷蒙的银河历来是人们追寻和探索的对象。远古人类以及处在孩提时代的现代人，无不神往于对宇宙天体的憧憬。明清之交，著名学者顾炎武说："三代以上，人人皆知天文"，在夏、商、周以前，中华民族的人文初始阶段，天象知识已经相当普及。《周易·系辞传》中说："古者庖牺氏之王天下也，仰则观象于天，俯则观法于地……始作八卦，以通神明之德，以类万物之情。"这里所说的庖牺氏，就是我们的人文初祖之一伏羲氏。考古学家 1987 年在河南濮阳发掘的仰韶文化遗存中，竟有由蚌壳和人骨摆放组成的青龙、白虎和北斗的星象图案，经碳 14 测定，年代为距今（6 460±135）年（图 0.1.1）。这一发现把中华民族的先民们仰观天文的历史推前到殷墟甲骨文之前又 3 000 年[①]。

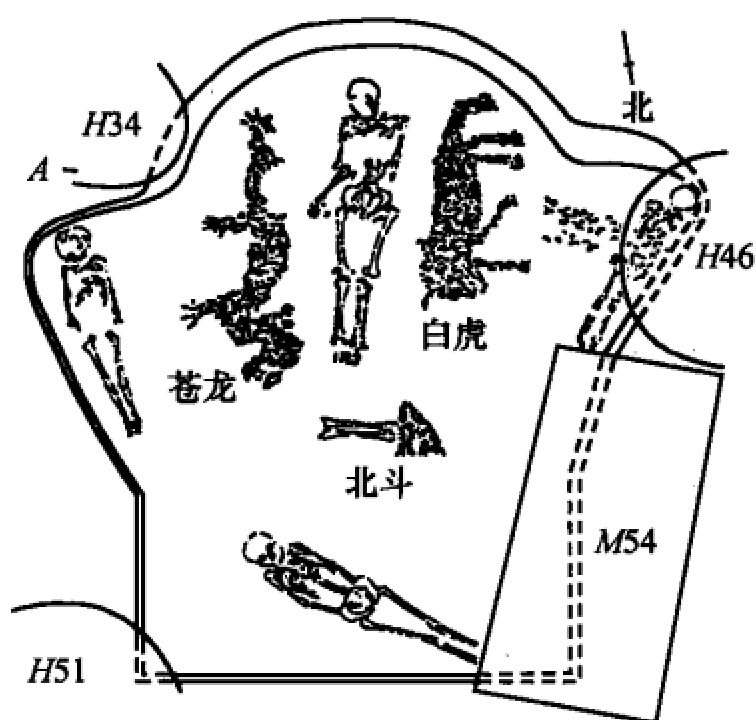


图 0.1.1　6 000 年前新石器时代的墓葬

2 300 年前的战国时代，一位忧国忧民的华夏诗人指天发问：天地形成之初，谁知道它的究竟？天若真有九重，它又如何架构？斗转星移皆绕极斡旋，那天极又支架在哪里？天圆地方，方圆结合之处怎能平服？日月缘何运行？众星何处安身？……重重发问，饱含着诗人对宇宙奥秘的探究精神。"路漫漫其修远兮，吾将上下而求索。"（屈原·离骚）

当代最伟大的物理学家爱因斯坦（A. Einstein）说过，对自然界"神秘而和谐"的探索和理解是他"永恒的欲望"，"对真理的追求要比对真理的占有更为可贵。"法国数学、物理和天文学家庞加莱（J. H. Poincaré）写道："科学家并不是因为大自然有用才去研究它。他们研究大自然是因为他们从中得到了乐趣，而这种乐趣来源于大自然的美。如果大自然不美，它就不值得研究，人也就不值得活下去……大自然的美是深邃的、本质的美，它来自各部分和谐的秩序，并且能为一种纯粹的智能所掌握。"庞加莱认为"大自然的简单和深远都是美"。对遥远而庞大的星系，对显微镜下极为纤细的生物结构，以及对地质年代中已逝去非常久远的遗痕的研究，都会给科学家带来欢乐。他说："正是为了理性本身，科学家

① 参见：冯时著《中国天文考古录》（成都：四川教育出版社，1996）。

才献身于漫长而艰苦的研究之中。”一句拉丁箴言说得好：“简单是真的标志，美是真理的光辉。”

探索宇宙是人类与生俱来的永恒的欲望。探索宇宙的成果是人类集体智能的结晶。天文学家总是在前人成就的基础上，上穷碧落下黄泉，进行更深层次、更广范围的宇宙探测。16 世纪哥白尼（N. Copernicus）的太阳中心说，改变了人们几千年来以为地球是宇宙中心的观念。17 世纪牛顿（I. Newton）建立的经典力学理论架构，使人们认识到天体也和地面上的物体一样服从统一的运动规律。18 世纪发现天王星，19 世纪首次测定恒星的距离，20 世纪初人们知道了太阳是银河系的一个成员，而且处在银河系中比较靠边的位置。20 世纪 20 年代肯定了河外星系的存在，美国天文学家哈勃（E. P. Hubble）首次测定了河外星系的距离；30 年代出现射电天文学；40 年代建成 5 米口径的光学望远镜；50 年代人造卫星上天；60 年代天文学四大发现；60～70 年代人类登上月球；80 年代航天飞机问世；90 年代哈勃空间望远镜被送入太空。世纪之交，一批口径 10 米级的光学望远镜建成或正在建造，各种目的的全波段大型观测设备已经进入太空或即将进入太空；21 世纪的头 20 年，人类有可能登上火星和在月球上建立天文观测基地。现代天文学家探测宇宙的能力已深达 137 亿光年的距离，观测到数以百亿计的星系。人类正在探究宇宙创生的历史和未来命运，寻访地球以外的生命或文明的踪迹。从遥远太空回眸地球，地球上看似渺小的人类，正用自己无穷的智慧和非凡的能力追寻着神秘而和谐的茫茫宇宙中发生的一切——这就是人类的追求、永恒的欲望。

0.2 天文学与人类社会发展的关系

天文学诞生和发展的动力源泉，不单是人的好奇心，更在于人类社会生活和生产实践的需要。创造尼罗河文化的古埃及人，在多年的农耕经验中发现，天上最亮的恒星天狼星一旦在黎明之前出现于东方地平线上，尼罗河水就要开始泛滥了。他们据此得知了相当准确的“年”的周期概念，把天体出没的规律与河水涨落的关系以及农作物生长周期和人所要采取的农业措施科学地结合在一起。中国、印度、古巴比伦、希腊、马雅这些远古文明发达的民族都有各自的以天象周期为基础的历法，用于指导农业生产和社会生活。即使逐水草而居的原始游牧民族也懂得根据星象确定方向、位置和季节。人类考古所能见到的最古老的文字，如古巴比伦泥版书上的楔形文字和中国殷墟的甲骨文，都有关于天文的记载。各民族观察天文的历史几乎和民族本身的历史一样久远。

如果说中国、古希腊和古阿拉伯人创造的天文学成就是人类天文学发展的第一次辉煌，它是以农业社会生产发展的需要为其动力，那么开始于欧洲文艺

复兴时期，以哥白尼、开普勒（J. Kepler）、牛顿为代表的人类天文学发展的第二次辉煌，则是伴随着工业社会生产方式的萌芽和发展而产生的。掠夺殖民地、人口三角贸易这些原始资本积累过程使航海技术空前发达，而航海是离不开天文的。

当代社会，人类以和平与发展为共识，科学技术居于社会的先导地位，科学技术水平成为衡量社会发达程度的重要标志。20 世纪 60 年代以来，信息技术、微电子技术、空间技术、能源革命和生物基因工程等新兴科学技术群迅速崛起，人类更加关注地球在宇宙环境中的地位、安全和未来命运，以更大的热情去探索宇宙深空的各种奥秘，寻找地球以外的生命乃至人类的知音。发达国家的科学研究投资中，天文学研究所占的比重不断增加，人才、技术和设备不断加强，天文学正在进入一个历史上新的辉煌时期。如果说，300 年前，哥白尼-牛顿时代的天文学发展是在几千年缓慢积累的基础上，人类认识宇宙的第一次飞跃，那么，在科学技术突飞猛进的当代，我们正面临着的天文学的新发展，将是人类认识宇宙的第二次飞跃。

数学、物理学、化学、天文学、地球科学、生命科学被认为是现代自然科学的六大基础学科。天文学与其他学科之间有着广泛的相互渗透、相互促进发展的关系，其中数学和物理学尤为突出。天体力学的奠基者牛顿、欧拉（L. Euler）、达朗贝尔（J. L. R. d'Alembert）、拉格朗日（J. L. Lagrange）、拉普拉斯（P. S. Laplace）、高斯（J. G. F. Gauss）、哈密顿（W. R. Hamilton）、庞加莱等同时也是数学大师。1942 年，爱因斯坦在纪念牛顿诞辰 300 周年的文章中写道："那些现代技术发展所不可缺少的理智工具，主要来自对星空的观察。""像牛顿那样的有创造能力的思想家……他们的思想由于凝视这星空而展翅高飞。"1950 年，爱因斯坦在国际外科医学院发表演说：在牛顿那个时代，"物理学像天体力学的小妹妹一样随之发展，而生物学则又是像物理学的小妹妹一样随之发展。"爱因斯坦的广义相对论是近代物理学的理论基础，但广义相对论几个方面的验证都在天上：弱引力场中的光线偏转、引力红移、雷达回波延迟、行星近日点进动和引力波。1915 年，卢瑟福（E. Rutherford）提出原子模型不到 4 年，天文学家证实了天狼伴星是一颗密度高达 250 万克/厘米^3 的白矮星，只有新提出的原子模型才能解释物质的如此高密状态。20 世纪 20 年代，天文学家爱丁顿（A. S. Eddington）研究恒星内部结构，提出恒星的巨大能量必定源自恒星内部的原子核反应；12 年后，物理学家贝特（H. A. Bethe）和魏茨泽克（C. F. Weizsacker）弄清了恒星内部的质子-质子反应和碳—氮—氧循环这两种热核反应的具体过程，并从此打开了新能源开发研究的大门。20 世纪 60 年代，天文学家发现脉冲星，证实了物理学家预言的中子星的存在，进而掀起了探索更高致密度的天体——黑洞是否存在的热潮。当代关于超新星、类星体、活动星系核和 γ 射线爆的探测成果，已经揭示

了宇宙中还存在着比热核反应更加强大的能源机制。19 世纪与 20 世纪之交，物理学的天空出现两朵小小的乌云（见 12.2 节），竟然酝酿出漫天的狂飙，动摇了几个世纪以来建成的物理学大厦。雨过天晴，相对论和量子力学这两座全新的、现代物理学理论架构巍然耸立，人类社会进入科学技术迅猛发展的新时期。20 世纪与 21 世纪之交，又有两朵乌云——暗物质和暗能量涌现天际，天文学中发现的 γ 射线爆、巨型黑洞附近的吸积流、引力透镜、宇宙加速膨胀等新奇天象，也许会促使人类像 20 世纪和 21 世纪之交，甚或像在文艺复兴时代那样，产生基本物理观念的革命性变化。

天文学与社会政治、宗教、文化的关系也比其他学科更为密切。古人敬畏上天，"仰之如日月，敬之如神明"（《左传·襄公十四年》）。历代封建统治者都以天子自居。"老子天下第一"，也只在天下称霸，不敢涉及天上。就连平民百姓的婚姻大事也要"一拜天地"。有人考证，"天文"原本是"天纹"，即天上显示的图像。统治者们想从"天文"中获得神明的启示，同时又利用"天文"维护自己的权威。所谓"天垂象，观吉凶"（《周易·系辞传》），"以保邦于未危，以处身于无祸"（唐·李淳风），中国古代的天文学始终是与王权政治并驾齐驱的。西方国家长期政教合一，文艺复兴时代，在科学与宗教的斗争中，天文学处在前沿地位。教会对哥白尼、布鲁诺（G. Bruno）和伽利略（Galileo Galilei）的残酷迫害，皆因他们的天文学从精神上动摇了宗教统治的根基。

在文学艺术领域中，天文学也有不可缺少的地位。法国一位作家说过："天上的星、地上的花、人间的爱是世上最美的三样东西。"芸芸众生，沧桑多变，世态炎凉，唯有遥远的天体给人以恬静、永恒的感觉。昭如日月、灿若明星，历来是文学艺术讴歌的对象，借以抒发人的情怀。天文学对于人类的精神有如同哲学、美学及艺术一样的治愈作用。天文学的基本知识，对于当代追求高尚知识素养的人，无论从事何种职业，都是值得学习的。

0.3 天文学的研究对象

天文学是研究天体和宇宙的科学。天体即大气层以外的物体，包括日月星辰和人造天体在内。天文学研究天体的位置、分布、运动、结构、物理状态、化学组成、相互关系及演化规律。宇宙是全部时间、空间和所有天体的总称。

天体有物质密集的形态如恒星、行星，有物质松散弥漫的形态如星云、星际物质，也有广延的连续形态如辐射带、磁层、引力场等。太阳系中的天体包括太阳、行星、矮行星、卫星、彗星、流星体、行星际物质。银河系中的天体有恒星（在恒星周围有类似太阳系中的诸天体）、星团、星云、星际物质。在银河系外面还有更广阔的时空和更高级别的天体系统。

地球作为一个整体也是天文学研究的对象。将来人类一旦建造起月面研究基地，地球就成为他们观测的天体，而在月球上进行的各种月面勘察研究工作反而不属于天文学的范畴了。常常有人误解天文学与气象学的关系。气象学属地球科学，它的研究对象是地球大气层中的各种物理过程及变化规律。气象学是与国民经济密切相关的重要学科，预报天气和研究气候特征是气象学的重要任务。

天文学的研究对象往往具备地面实验室难以达到的条件：极端的冷与热、缓变与爆发、稀薄与密集、极高能量、极强磁场、极大引力和极长时标的演化，提供人类发现与验证自然法则的无法仿真的场所。许多物理学家认为，天体物理学是近代物理学中最热门、最有前途的领域之一。现代天文学研究还促进现代光学、信息科学、计算机科学、精密仪器与新材料新工艺的发展，许多尖端技术都应天文学的需要而产生，又在天文学研究中首先得到应用。

天文学帮助人们正确认识自己在自然界中的地位，摆脱愚昧、升华理性思维。仰望星空，人们不得不折服，在浩瀚的宇宙面前，地球是多么渺小，人的一生又何其短暂，然而正因为如此，人类才应该更加珍惜自己的生命，把个人的心灵与人类社会和广阔自然融为一体，实现自己的人生价值。

0.4　天文学的分支学科和研究方法

天文学有三个主要的分支学科：天体测量学、天体力学和天体物理学。

1. 天体测量学

天体测量学是天文学中最先发展起来的一个分支，主要任务是研究和精确测定天体的位置和运动，建立和维持基本参考坐标系，确定地面点的坐标以及提供精确的标准时间服务。现代天体测量学已从传统的地面光学测量发展到采用雷达测距技术、射电干涉技术和太空技术，进行多波段测量，定位精度达到 $0''.001$，太空至地面的距离测量精度达到厘米级。基本参考坐标系已由传统的静态恒星参考系发展到动力学参考系和以遥远的银河系外天体为基准的射电参考系。新兴的边缘学科——用天文方法研究地球自转和地壳运动的天文地球动力学也属天体测量学的范畴。

2. 天体力学

天体力学主要研究天体运动的动力学问题，包括天体的力学运动和形状。力学运动是指天体质量中心在空间的移动和天体绕质量中心的转动；形状是指天体在内部引力、热辐射压力和自转离心力作用下弹性平衡的形体及其变化规律。天体力学的理论基础是常规运动速度下的牛顿引力定律和超常运动速度（接近光

速）下的狭义和广义相对论。天体力学采用定性理论、摄动理论和数值方法确定天体的运动和长时间内轨道变化的情况。天体力学还用于人造天体的轨道设计，计算彗星、小行星轨道，预报日、月食，预报太阳系内天体碰撞事件等特殊天象。一些恒星系统和星系的动力学问题也属天体力学的研究范畴。

3. 天体物理学

天体物理学是天文学中最年轻、也是最活跃的分支，主要任务是应用物理学的技术、方法和理论，研究天体的表面物理状态、内部结构、化学组成、相互关系和演化规律。天体物理学与现代物理学理论及仪器技术的发展关系密切，也是当代天文学成果最多的一个分支。20 世纪 60 年代的天文学四大发现，关于黑洞的理论和探测、恒星演化和宇宙论的研究都属天体物理学的范畴。有些物理学家认为，天体物理学也是天文学与物理学的边缘学科。1964～2006 年，诺贝尔（A. B. Nobel）物理学奖有 9 个年度 12 项天文课题的 16 位科学家获奖（见表 0.4.1），获奖项目都是天体物理学的课题。

表 0.4.1 荣获诺贝尔奖的天文课题

年 代	国 籍	人 名	得奖贡献
1964	美	汤斯（C. H. Townes）	开拓星际分子研究
1967	美	贝特（H. A. Bethe）	研究核反应理论，发现恒星核能源
1970	瑞典	阿尔文（H. O. G. Alfven）	研究磁流体力学，应用于太阳磁场、行星际等离子体等问题
1974	英	休伊什（A. Hewish）	发现脉冲星
	英	赖尔（M. Ryle）	创建综合孔径射电望远镜，探测极其遥远的宇宙射电源
1978	美	威尔逊（R. W. Wilson）	发现宇宙微波背景辐射
	美	彭齐亚斯（A. A. Penzias）	
1983	美	钱德拉塞卡（S. Chandrasekhar）	研究恒星结构和演化理论，发现白矮星质量上限
	美	福勒（W. A. Fowler）	创建恒星演化过程中化学元素形成的理论
1993	美	泰勒（J. H. Taylor）	发现第一例出现在双星中的射电脉冲星 PSR1913+16，出色地验证了广义相对论关于存在引力辐射的预言
	美	赫尔斯（R. A. Hulse）	
2002	美	贾可尼（R. Giacconi）	开拓 X 射线天文学
	美	戴维斯（R. Davis）	开拓中微子探测工作
	日	小柴昌俊	
2006	美	马塞（J. Mather）	发现宇宙微波背景辐射的黑体形式和各向异性
	美	斯穆特（G. Smoot）	

天文学是观测科学，同时也是综合科学。它的研究对象都在遥不可及的宇宙

空间，既不能取样分析化验，也不能亲临实地勘察，研究的唯一方法就是观测——用各种仪器观察和测量从天体辐射来的电磁波或少量的高能微观粒子。现代天文学最重要的观测仪器是天文望远镜。望远镜收集的天体信息量与其口径的平方成正比。20 世纪前 50 年，光学望远镜的口径从 2 米发展到 5 米，至 90 年代已跃至 10 米，信息收集能力比肉眼提高 300 万倍。

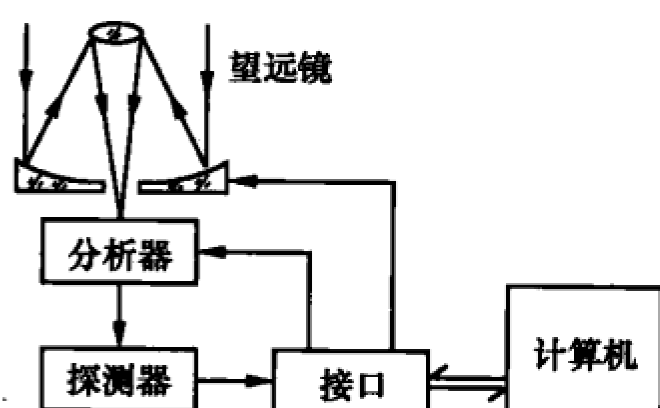


图 0.4.1　现代天文望远镜系统

现代概念的天文望远镜是天体信息的收集器。它收集到的天体信息要传送给信息接收设备，再进入计算机适时处理（图 0.4.1）。与望远镜配套的信息接收设备是各种分析仪器和光电转换装置。计算机担任天体信息的最后处理，同时发送控制信号，控制望远镜和接收设备的动作和状态。

天文学家直接用眼睛对着望远镜观测天体的时代已经成为历史。照相技术在近代天文学研究的历史上起过非常重要的作用，现在已经或正在逐渐为更新的技术所取代。在现代化的天文台里，天文学家的工作场所可能离望远镜很远，他们面对的是计算机终端或其他信息显示设备。光学波段，尤其是可见光波段是天体电磁波辐射中很窄的一小段。只限于观测光学波段的时代也已成为过去。20 世纪 50 年代以后，射电天文和空间天文仪器相继出现，开展了对天体的射电辐射和红外线、紫外线、X 射线和 γ 射线的全波段观测研究。现代最大射电望远镜的口径已达到 100 米、110 米（跟踪式，德国波恩天文台和美国国家射电天文台）和 305 米（固定式，设在波多黎各的美国阿雷西博天文台）。近 30 年来，空间天文学长足发展，设备投资大约是地面天文设备的 10 倍左右。各种探测器、宇宙飞船飞往太阳系各大行星。人类已经登陆月球，踏上火星也将为期不远。1989 年和 1990～2003 年相继上天的天体测量卫星和哈勃空间望远镜、钱德拉空间望远镜、斯必泽空间望远镜都取得了非常令人瞩目的观测成果。

21 世纪的前 50 年，人类将要建造口径 30～100 米级的地面光学望远镜，口径1 000 米级的地面射电望远镜，还将在月球上建立天文观测基地，将口径 6.5 米的空间望远镜和星座式 X 射线天文台发射到离地球 150 万千米、绕太阳运行的轨道上。空间望远镜的测角精度将达到 10^{-6} 角秒。人类将在对高能天体的研究中，获知比热核反应高几个数量级的能源机制，从而掌握更加强大的新能源。人类将继续探索地外文明，努力争取与外星人建立通信联络，还将把所有可能危及地球安全的太阳系小天体全部纳入监控系统之中。有史以来，人类认识宇宙的第二次飞跃的时代，正展现在我们面前。

第1章 宇宙概观

往古来今谓之宙，四方上下谓之宇。

——《淮南子·齐俗训》

苍天，你还有秘密吗？
人类已揭开面纱，一切都显露无遗。

——雪莱，《解放了的普罗米修斯》

1.1 地 月 系

1.1.1 地球和月球

太阳系八大行星中，除水星和金星以外都有卫星。至2000年年底已知的卫星总数有65颗，至2005年5月增加到153颗，其中39颗（木星15颗，土星13颗，天王星6颗，海王星5颗）尚未正式命名。至2008年10月9日，又新发现13颗土星卫星，卫星总数增加到166颗，其中待命名的22颗（木星14颗，土星8颗）。具体的分布情况见图1.1.1，括号中的数字是太空时代以前就知道的卫星数目。在这些卫星中，地球的卫星月球、也是离太阳最近的卫星有特殊地位：卫星与行星的质量比特别大。表1.1.1列出了166颗卫星中半径比月亮大的4颗以及各行星半径最大的卫星及它们与各自行星的质量比。月球与地球的质量比1∶81，远远大过其他卫星与其行星的质量比。

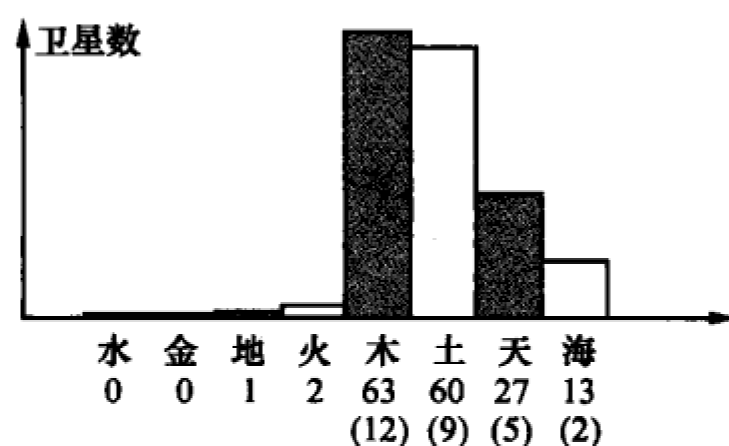


图1.1.1 太阳系卫星分布

表1.1.1 卫星与行星的质量比

卫 星	半径/千米	质量比（1∶）
木卫三	2 631	12 800
土卫六	2 575	4 210
木卫四	2 400	17 600
木卫一	1 815	21 300
月球	1 738	81
海卫一	1 350	4 780
火卫一	14	6.68×10^{7}
天卫四	760	29 870

根据地球和月球形成的历史，可以说它们是一对姊妹、一对母女或一对情人。如果它们同源于一个母体——太阳系原始星云的一部分，那么算是一对姊

妹；如果月球是在地球形成之后，从地球分化出的一部分质量形成的，那么就是母女关系；如果月球另有别的来源，在特定条件下被地球俘获，然后形影不离，互相绕着转，这就好比是一对情人了。现在又有一种新的说法：在太阳系形成之初，一个火星般大小的团块撞击尚未凝固的原始地球，造成地球自转轴倾斜，并喷发出一部分物质，凝固之后，形成了月球（光盘图 1.1.2　月球起源的撞击形成说）。太阳系的起源，包括地球和月球的起源问题，至今尚无定论。

由于地球和月球质量相差不太悬殊，距离也不算远，在天体力学中把它们当作一个系统来看待，称为地月系。地月系的质心在地球本体之内，距地球质心 L=4 700 千米，而地球的半径是 6 378 千米（图 1.1.3）。月球绕地球公转，其实是月球和地球都绕地月系的质心转，周期是 27 日 7 时 43 分 11.545 秒，称为恒星月。月球自转也是这一周期，所以月球总以同一面对着地球。请看图 1.1.4，当月球在 A 点时，箭头指向地球，过了 1/4 个月，月球走到 B 点的位置，同时它也自转了 1/4 圈，箭头由原来的指向转了 90°，仍然指向地球。再过 1/4 个月，月球走到 C 点的位置，同时又自转了 1/4 圈，箭头仍然指向地球。同理，月球走到 D 点后又回到 A 点，在整个公转过程中，箭头始终是对着地球的。站在地球上的人永远看不到月球的背面，当然站在月球背面的人也永远看不见地球。直到 1959 年 10 月 4 日，苏联发射的月球 3 号卫星，首次飞越月球背面，拍回了月球背面的照片，人类才第一次看到了月球背面的情况（光盘图 7.4.2）。一度传闻月球背面藏有类似美国 B52 轰炸机的外星人攻击武器，后来被戳穿，是一个美国人利用照片合成技术所作的恶作剧。

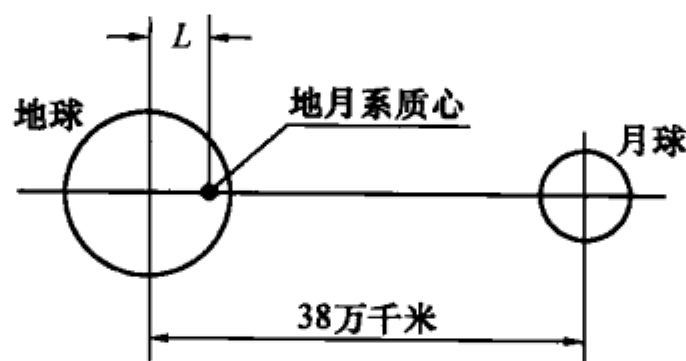


图 1.1.3　地月系质心

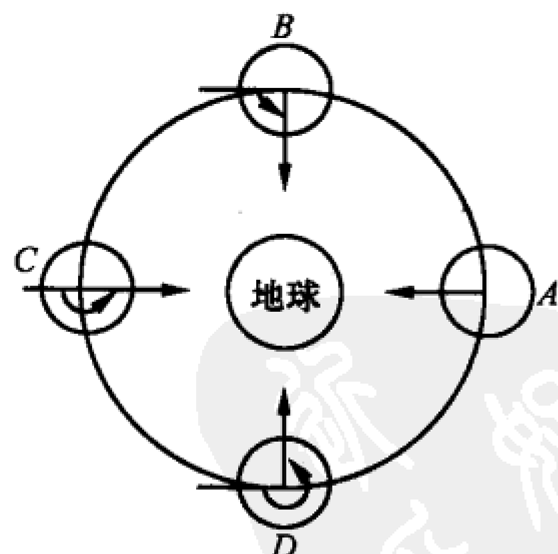


图 1.1.4　月球总以一面对着地球

月球直径与月地距离之比和太阳直径与日地距离之比，两个比值近乎相等。所以在地球上看太阳和月亮，两者圆面大小是一样的。太阳光焰夺目，月亮皎洁明媚；日常丰满，月有亏盈；一阳一阴，时聚时散，但皆东升西落，行进在大致相同的天空轨道上。它们是与人类生存关系最为密切的两个天体。

地球和月球亲如姊妹、母女或情人，但这两个星球上的环境状况相差悬殊。

月球表面重力只有地球的 1/6，引力小到无法留住做自由运动的气体分子，所以月球没有大气，当然也就不会有表层液态的水；即使曾经有过，也会因为不断蒸发变成水汽而逃逸掉了。1998 年，美国的一项月球考察探测到月球两极有与石头、泥土混合在一起的冰层，含水量约 66 亿吨，并推测这是一些以冰为主要成分的彗星撞击月球后留下的“遗骸”。这一结果尚待进一步核实，但很有可能是真实的（详见 11.5.1 小节）。

月球的自转周期约 27 天，再加上绕地球公转的因素，月球上的一昼夜平均 29 天多，月球自转赤道面对黄道面的倾角很小，只有 1°.5，所以月球基本上没有四季变化，但有强烈的昼夜反差。月面上一昼夜间阳光照射 14 天半，另外 14 天半完全沉浸在黑夜里。月球表面的岩石完全裸露在太空环境中，不像地球有大气和海洋对温度的调节作用，所以白天酷热，温度高达 127℃，夜间奇冷，温度低至－183℃。由于没有大气散射阳光，即使是白天，天空也是漆黑的，太阳和星星都在天幕上同时发光。蔚蓝色的地球比在地面上看到的月亮直径大 4 倍，也有圆缺变化。没有大气就没有风霜雨露，更不用说蓝天和彩虹了，甚至连声音也无法传播；没有大气的屏蔽作用，就不能阻挡紫外线、X 射线和 γ 射线、流星和宇宙线的轰击，所以月球是一个使生命充满危机的、不适合生命存在的死寂的星球。1969 年 7 月 20 日格林尼治时间 20 时 18 分，阿波罗 11 号宇宙飞船的登月舱在月球静海着陆，21 日 2 时 56 分美国航天员阿姆斯特朗（N. A. Armstrong）从阿波罗 11 号宇宙飞船的登月舱走出来，在月球表面的沙土上踩下了人类的第一个脚印（光盘图 7.4.6）。如果没有外来因素的破坏，航天员的脚印将永远保留在月面上。月球上没有空气和水，更没有任何生物。登上月球的航天员，在满目荒凉的月面上，只有抬头看到天空中那美丽的家乡——地球时，才会涌现一丝温馨的感受。

1.1.2 地球是太阳系中唯一适宜生命繁衍的星球

至 20 世纪 60 年代，人类的足迹已经踏上月球，80 年代人类用以采集信息的仪器设备已经在火星和金星表面实现软着陆，人类发射的探测器已经拜访过各大行星的邻近区域。得到的结论是：太阳系中除地球以外的星球上，不可能有高级生命存在，地球是唯一适宜生命繁衍的星球。蓝色的海空、白色的云朵、绿色的植被，地球是太阳系天体中最美丽的星球（光盘图 1.1.5 阿波罗飞船拍摄的地球；光盘图 1.1.6 环境应用同步卫星拍摄的地球）。之所以如此，是因为地球在太阳系中具有得天独厚的优越条件，主要有如下三项。

1. 优越的行星位置

八大行星中，按离太阳远近的顺序排行，地球是老三，得到的太阳辐射照度

适中，加上有大气层保护，大气中二氧化碳的含量较低，有较弱的温室效应，所以地球上年平均温度为 15℃左右，最适宜生命繁衍。所谓温室效应是指大气中的二氧化碳能透过太阳辐射来的可见光，但不能透过地面发出的红外线辐射，地表热量不能散发到大气层外面，而使地表升温的效应，类似温室里的情形。地球的前后邻居，金星离太阳更近，受太阳辐射较多，大气中二氧化碳浓密，温室效应极强，表面年平均温度高达 480℃（光盘图 1.1.7　炼狱般的金星）；火星离太阳远，受太阳辐射少，大气稀薄，虽有较强的温室效应，年平均温度只有 −60℃（光盘图 1.1.8　干燥荒凉的火星）。金星和火星的环境温度对生命的繁衍都是不适宜的。离太阳更近的水星和更远的其他大行星，温度条件就更加恶劣了。地球所处的优越的行星位置是地球上生命繁衍的首要条件。有关行星位置的数据列于表 1.1.2。

表 1.1.2　有关行星的一些数据

八大行星	排　行	到太阳的距离/亿千米	受太阳的辐照功率/(千瓦/米^2)	大气中 CO_2 含量/%	温室效应	表面平均温度/℃
金星	2	1.1	2.6	97	极强	480
地球	3	1.5	1.4	<1	很弱	15
火星	4	2.3	0.6	95	较强	−60

2. 优越的物理状况

由质量和半径决定的地球表面引力场，重力加速度为 9.8 米/秒^2，形成一个适宜生命繁衍的引力环境。受过专门训练的航天员虽然能够在失重环境下生活，但太空医学研究表明，长期失重会导致人体的平衡和定向控制能力失调，体液和血液循环系统障碍，甚至影响人体的免疫力和遗传基因。太空生物实验表明，在失重条件下发育的昆虫，生命周期缩短。行星的引力场太弱会导致大气分子逃逸。如果地球没有了大气，地球表面的环境就不堪设想了。引力场过于强大，使人体在同样质量的情况下重量增加，当然也不是好事。

地球大气成分 76%是氮，23%是氧，有少量的水蒸气和二氧化碳气。近地面大气层的平均密度是 1.22 千克/米^3。生物体的新陈代谢离不开大气，没有大气生命就不能存活。除此之外，大气层还对地表温度有重要的调节作用，大气层阻挡了太阳紫外线和流星体的袭击。阻挡紫外线的主要物质是大气中的臭氧层。臭氧是由 3 个氧原子组成的一种氧分子，有臭味，是一种强氧化剂。臭氧层分布在离地面 20～30 千米高空，只有薄薄的一层。人类排放的氟利昂（$CFCl_3$）等气体有破坏臭氧层的作用。阻挡及吸收 X 射线和 γ 射线的，主要是高空电离层中的大气分子、原子和离子。流星体是太阳系空间中广泛存在的细碎的小天体，

在地球引力场作用下向地面降落时，绝大部分都在大气层中与大气分子摩擦燃烧掉了。如果没有大气层保护，大量流星体袭击地面，后果也是相当严重的。

地球表面70%是水，30%是陆地，总储水量140亿米^3。水不仅是人类和其他生物生存所必需的，而且在地质演化和生物进化过程中起着重要作用。水体能储存大量的热能，对地球昼夜温差起重要的调节作用。太阳蒸发大洋和其他地表水，升上蓝天变成白云，再以雨雪等形式降落地面，流向海洋，这一水的循环过程是生态平衡系统的重要保障。全球每年有约500万亿米^{3}的水在海空之间循环不已。如果没有这种循环，或者没有70%的水面，水的循环规模受到影响，地球环境又要大大改变了。

3. 恰到好处的自转与公转

地球自转使地球上有昼夜变化，周期约为24小时。自转造成的赤道线速度为0.465千米/秒。地球自转的角速度很小，钟表上的时针每天转两圈，地球自转每天才转一圈。平稳而缓慢的自转使地球上的人们毫无觉察，但自转对地球表面温度的均衡是至关重要的。好像在炉火上烘烤食物必须及时翻转一样，地球在太阳辐射下也必须时时翻动自己的身躯，才能获得均匀的热量。水星自转太慢，一昼夜长达176天，水星上的一天地球上竟然过了半年，所以水星白天温度高达427℃，而夜晚冷到−175℃。木星自转太快，一昼夜只有9小时，如果地球自转也这么快，人类和其他生物的生命节律就要大不相同了。

地球公转的周期是365天多，这一周期长短是由到太阳的距离决定的。距离太阳越近，周期便越短。水星的公转周期是88天；木星的公转周期是11.86年，木星上的一年有10 500多个昼夜；海王星的公转周期是165年。人活一生也只是海王星上的半年。地球在公转过程中，自转轴保持着23°26′的倾斜角度，这是造成南北半球一年四季和昼夜长短变化的原因。它使季节与气候形成明显的以年为周期的节律，这对于大多数生物的生命周期和生活规律也是至关重要的。

1.1.3 地球的形体和地月系年龄

严格的地球形体概念是指不受潮汐、气压和波浪影响的静止海水面以及假想这个海水面向陆地延伸而包裹地球的形体，称为地球体。地球体的表面称为大地水准面，又叫引力场等势面。精确测量地球体是大地测量学的任务。地球体接近于一个数学上的旋转椭球体，与之只有极微小的差别。1976年国际天文学联合会天文常数系统以一个最接近地球体的旋转椭球体作为地球的标准形体，称为参考椭球体。它的参数为

地球赤道半径　$a = 6\ 378\ 140$ 米(基础常数)

地球扁率因子　$1/f = 298.257$(导出常数)

由这两个参数可以计算出

$$\text{地球极半径} \quad b = 6\,356\,755\ \text{米}$$

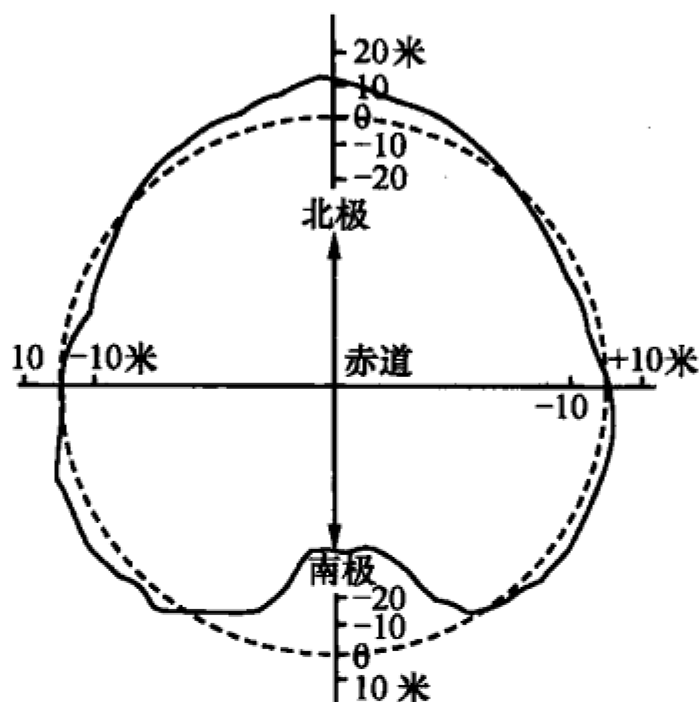


图 1.1.9　地球形体对旋转椭球体的起伏

20 世纪 70 年代卫星大地测量以 10 厘米的精度给出了大地水准面相对于参考椭球体表面的起伏。三位美国地球物理学家以夸大的比例尺发表了一张图（图 1.1.9），表示地球体与参考椭球体的差别。差别较大的地方是：在南极有约 30 米的凹陷，在北极有约 10 米的隆起，其余地区差别更小。有人曾形容地球像一只橘子（扁球）或根据图 1.1.9 形容地球像一只梨，还取了所谓"地球梨状体"的名称。这些都是不正确的，有损于地球的真实形象，容易造成误导。其实，地球相对于一个正球体的偏离是很微小的，如同用圆规画一个直径 12 厘米的圆，两极只扁了 0.4 毫米，而且所有地球表面上的高山深渊也都不超过这 0.4 毫米的范围。至于极区的凹陷和凸起，只有 0.6 微米，眼睛根本分辨不出来。可以说地球是一个相当浑圆的球，根本不像梨或橘子。

地球表面重力加速度的平均值是 9.806 65 米/秒^2。某个物体如果以 7.9 千米/秒的速度沿赤道运动，所产生的离心力就会与重力相平衡而处于失重状态。这时，物体就会沿圆轨道绕地球运动，它所受到的地球引力刚好等于物体做圆周运动所需要的向心力，而不需要添加任何别的动力，这就是人造卫星的飞行原理。7.9 千米/秒称为第一宇宙速度，也叫环绕速度。如果速度加快，飞行轨道将拉长成为椭圆形。当速度达到 11.2 千米/秒时，轨道变成抛物线，物体会脱离地球引力场的束缚，一去再不回头，这一速度称为第二宇宙速度，也叫脱离速度或逃逸速度。当速度达到 16.7 千米/秒时，物体将脱离太阳引力场的束缚，飞出太阳系，奔向别的恒星，这一速度称为第三宇宙速度，也叫超越速度。三种宇宙速度的详细推算见 4.4 节。

地球的质量是通过全球地面重力测量和卫星大地测量对 GE 值的测定得到的。GE 值也叫"地心引力参数"，即地球总质量与万有引力常数的乘积，在数值上等于一个质量为地球总质量的假想质点，对距离 1 米处另一个质量为 1 千克的质点所产生的引力。1976 年国际天文学联合会天文常数系统采用的值为

$$GE = 3.986\,005 \times 10^{14}\ \text{米}^3/\text{秒}^2\text{（基础常数）}$$

而 G 的采用值为

$$G = 6.672 \times 10^{-11} \text{ 米}^3/(\text{千克}\cdot\text{秒}^2)\text{(基础常数)}$$

由此算出地球的质量为

$$M_E = GE/G = 5.974 \times 10^{24} \text{ 千克}$$

再由地球的体积 1.0832×10^{21} 米^3，可以算出地球的平均密度为 5.515×10^3 千克/米^3。

月球的形体也是一个旋转椭球体，它的赤道半径是 1 738 千米，扁度 1/3 476，极半径只比赤道半径少 0.5 千米，比地球更加浑圆。一般说天体成扁球状是自转离心力造成的，月球自转比地球更慢，离心力更小，所以扁的程度更小。

地月系的年龄，根据对地球岩石和月球岩石标本的放射性同位素测定，以及根据岩石中铀和铅的含量推算熔岩凝固之前的过程，普遍承认的数据为（45.7±0.03）亿年。地球上一些重大历史事件的年表和按缩小比例算出的数据列于表 1.1.3。

表 1.1.3 地月系的时标

地月系形成以来的历史	实际时标	地质年代	按比例缩小的时标
地月系形成	46 亿年		100 年
岩石形成	38 亿年		83 年
生命形成	36 亿年	震旦纪以前	78 年
第一次生物大发展	5.5 亿年	寒武纪	12 年
生命向陆地移居	3.5 亿年	泥盆纪	7.6 年
恐龙兴盛	2 亿年	三叠纪	4.3 年
哺乳动物出现	0.7 亿年	白垩纪	1.5 年
人类形成	300 万年	第四纪	<1 个月
有文字的历史	6 000 年		1 小时
人类进入太空	50 年		0.5 分钟

转动物体的离心加速度 $J=\omega^2 R$，其中，ω 是转动角速度，R 是转动半径。在地球赤道上，$R=6.38\times10^6$ 米，$\omega=(2\pi/86\,164)$ 弧度/秒$\approx 0.73\times10^{-4}$ 弧度/秒，所以

$$J = (0.73 \times 10^{-4})^2 \times 6.38 \times 10^6 \text{ 米 / 秒}^2 \approx 0.034 \text{ 米 / 秒}^2$$

如果转动速度加快 17 倍，$J\times17^2\approx 9.8$ 米/秒^2，离心加速度将与重力加速度平衡。地球赤道上的转动线速度$=(2\pi R/86\,164)$ 千米/秒≈ 0.465 千米/秒，加快 17 倍，将达到 7.9 千米/秒，这就是环绕速度。

设地球全部质量 M_E 集中在地心而形成一个质点，它对距离 r 处另一质量为 m 的质点有引力 F 为

$$F = G\frac{M_E \cdot m}{r^2}$$

对 m 质点产生的加速度为 g。据牛顿第二定律，应有

$$F = mg = G\frac{M_E \cdot m}{r^2}$$

或

$$GM_E = r^2 g$$

这就是计算地心引力参数的公式。r 由大地定位测量获得，g 由重力测量获得。地面重力测量分两种：绝对重力测量直接测量落体的重力加速度 g；相对重力测量比较不同地点之间的重力加速度之差。现代卫星大地测量和重力测量技术还可以获得地球引力场空间各点的 r、g。

将全球地面和太空测量的 r 和 g 的实测值扣除各种干扰因素产生的影响，统一化算为共同的 $G \cdot M_E$ 值，这就是地心引力参数 GE，它是天文常数系统的基础常数之一。引力常数 G 既是天文常数系统中的基础常数，也是物理学中重要的基本常数。G 最早是由卡文迪许（H. Cavendish）于 1798 年用纽秤方法测出的。现代测定值为

$$G = 6.674\,28(67) \times 10^{-11}\ 米^3/(千克 \cdot 秒^2)$$

（2006 年的国际推荐值，括号内的数表示最后两位数的标准误差）

1.1.4　地球的内部结构和三大冰期

地球内部的结构，是地球物理学研究的内容。地壳由岩石构成，厚度很不均匀。最厚处在我国青藏高原，厚达 65 千米，最薄的深海沟只有 5～8 千米，全球平均约 35 千米。地壳上面是水圈和气圈。地壳下面是地幔，厚约 3 000 千米，由超基性岩构成，具塑性，可缓慢流动。再往下是外核和内核，直达地心。地壳下面的温度随深度增加而增加。100 千米深处的地幔温度约 1 500℃，地幔与外核交界处的温度达到约 4 500℃，地心温度在 6 000℃以上。地震波探测表明，外核是液态的，内核是固态的，它们的密度都在 10 克/厘米^3 以上。地壳、地幔、外核和内核的质量分别占地球总质量的 0.5%、67%、30.8%和 1.7%。地球的化学成分主要是铁、氧、硅、镁的化合物，这四种元素的质量加在一起，占地球总质量的 90%。地核的主要成分是铁。

当代地壳板块模型指出，全球地壳不是整体的，而是分成几个大的板块。板块与板块之间在地幔层上缓慢移动。大约 2 亿年前，欧亚大陆与美洲大陆是连在一起的，后来才裂开并慢慢漂移到现在的位置，形成大西洋。印度次大陆原来不属于欧亚板块，它是从南极方向漂移过来的。当印度板块与欧亚板块撞在一起的时候，交界之处挤压隆起，形成喜马拉雅山脉。日本列岛位于太平洋板块与欧亚板块交界处，将来有可能在板块运动之中被挤入大海，从全球陆地版图中消失（光盘图 1.1.10　地壳板块移动示意图）。板块运动和地底下的高温，说明地球内部蕴藏着巨大的能量，火山、地震、海啸都是这种能量释放的过程。曾经有过一种说法，认为地壳下面普遍存在着高温熔融的岩浆，这是不正确的。岩浆是在一定条件下才会产生的局部熔融现象。最直接考察地壳深处的研究方法是钻探取样。目前人类打得最深的钻井在俄罗斯，深 12 262 米，但离钻透地壳还很远。2005 年中国在江苏东海县，完成了深 5 158 米的钻井，进行地球物理研究。地球

内部现在还有很多细节，无法了解清楚（光盘图 1.1.11　地球内部结构示意图）。

地质学家们认为，地球上有过三次大冰期：距今 6 亿～7 亿年前的震旦纪大冰期；距今 2.5 亿～3 亿年前的石炭-二叠纪大冰期和距今 200 万年以前的第四纪大冰期。每一次冰期，全球气候严寒，冰盖绵延，冰河遍地。但古生物学研究表明，在三大冰期时期，都有生物存活。虽然在震旦纪时代，只有原始藻类的遗迹，而另外两大冰期，都有高级生物生存的证据。人类的进化是在第四纪大冰期中完成的。在整个大冰期中，又出现过 5 次亚冰期和夹在当中的间冰期时代，五度寒暖交替。全球人类的文明史是在约 1 万年前开始的间冰期时代中发育成长的，而 1 万～10 万年前的原始人则生活在气候寒冷的亚冰期中。人类的历史经历了 5 次寒暖交替的考验。亚冰期时代，在与严寒作激烈斗争的条件下，原始人类得以保存并有所发展；间冰期时代，气候温和，生物繁盛，人类在经历了亚冰期的严峻锻炼之后，获得了有利于生产和改进生活的条件，得到更大的发展。我们有幸生活在间冰期时代。但现代间冰期将延续多久，又进入下一轮亚冰期？这是人类关心的重大问题，现在还没有可靠的预测证据。

1.1.5 月相

“人有悲欢离合，月有阴晴圆缺，此事古难全。”（宋·苏轼·水调歌头）除了日出日落昼夜更替之外，在所有天象中最频繁出现也最引人注目的莫过于圆缺变化的月相了。唐朝诗人李贺在《金铜仙人辞汉歌》中有一句“天若有情天亦老”，词深意险，历 200 年无人能对。直至宋朝，文学家石曼卿才对出一句“月如无恨月长圆”，非常工整贴切。司马光评为：“李贺句奇绝无对，曼卿词堪称勍敌。”（宋·《司马温公诗话》）被传为诗坛佳话。其实月相变化的原因很简单，是日月地三个天体的位置变化引起的。月亮自身不发光，照亮它的太阳光再反射到地球，才能为人们看见。如果太阳照亮的半个月球球面与地球上看见的半个月球球面不能完全重合，那么人们看见的只是两者重合的部分，其形状称为月相。月相的一侧总是半圆，另一侧随月球运转而不断变化，月相便由圆到缺又由缺到圆。半圆的一侧总是朝向太阳，交会处的两点联机一定通过月面中心。

月相变化的周期叫盈亏周期或朔望周期，就是中国农历的一个月。它的平均长度等于 29.530 588 2 日。朔望月比真正的月球公转周期恒星月长，恒星月只有 27.321 661 40 日。它们的关系见图 1.1.12。从朔开始，当月球经过一个恒星月以后由位置 1 到位置 2，而在这段时间里，整个地月系绕日公转了一个角度 θ，月球还没有到达下一个朔的位置，必须再运动一个 θ 角才能完成一个朔望周期。这段时间就是朔望月与恒星月之差。由于地月系公转轨道速度不均匀，θ 角有时略大，有时略小，所以朔望月周期也是不均匀的。

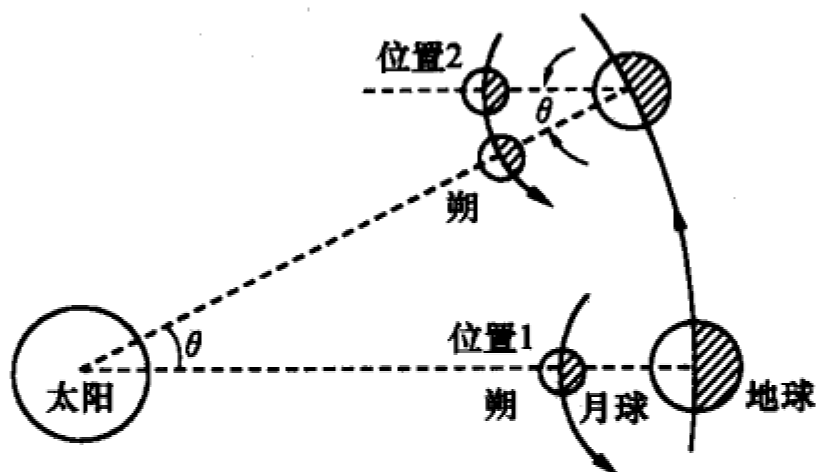


图 1.1.12　朔望月与恒星月的关系

由朔起算至各种月相，以日为单位的时间长度称作月龄。图 1.1.13 画出的是不同月龄时月相的变化，数字表示月龄。朔时，月在日地之间，月球对着地球的半面刚好是阳光照不到的半面，而且月球与太阳在同一方位，月球位于白天太阳附近的天空中，人们看不见月亮；望时，地在日月之间，月球对着地球的半面刚好是阳光照亮的半面，人们便看到一轮明月，而且整个夜晚人们都能看到月亮。上弦或下弦，日月相距 90°，月球对着地球的半面有一半阳光灿烂，另一半一片漆黑，人们看到的只是半个月亮。发生在农历上半月的为上弦，发生在农历下半月的为下弦。在其他日期，人们看到不同月龄的月相，有时像弯弯蛾眉（新月或残月），有时一侧凸起，称凸月。在农历上半月，月相右侧总是圆的，随着月龄增大，左侧逐渐变化，由朔到望，亮的部分越来越大，由缺到圆；在农历下半月，月相左侧总是圆的，随着月龄增大，右侧逐渐变化，由望到朔，亮的部分越来越少，由圆到缺。上弦以前的月相只见于半夜以前，下弦以后的月相只见于半夜以后。

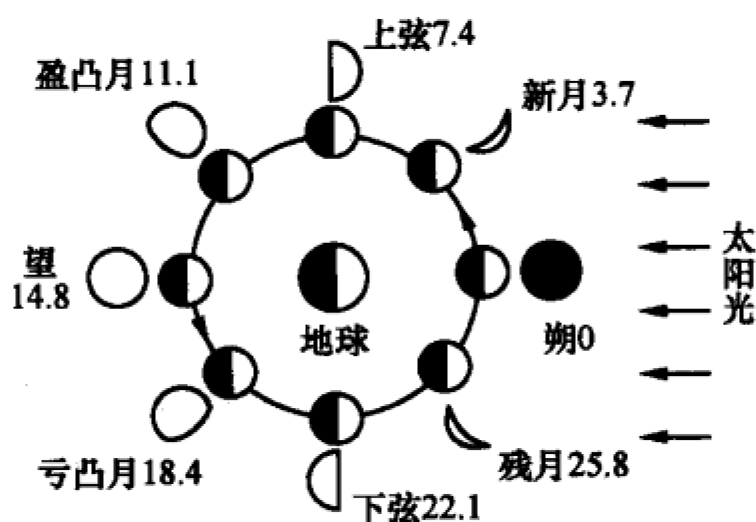


图 1.1.13　月相的变化

月相、农历日期、观月时间和月亮方位之间有相对确定的关系。在北半球中纬地区（北回归线以北），太阳和月亮总在南半个天空中东升西落，这是地球自转的反映。面向南方时，左手是东右手是西。一日之内，日在白天，月在夜晚，都是从左到右，不断西行，每天西行一圈。同时，月球绕地球公转的运动是由西向东，与东升西落的方向正好相反，一月之内，相对于太阳而言，月球自右向左东行，每月一圈，每天东行约 12°。图 1.1.14 所示是农历上半月黄昏所见的南半天空。太阳在西边地

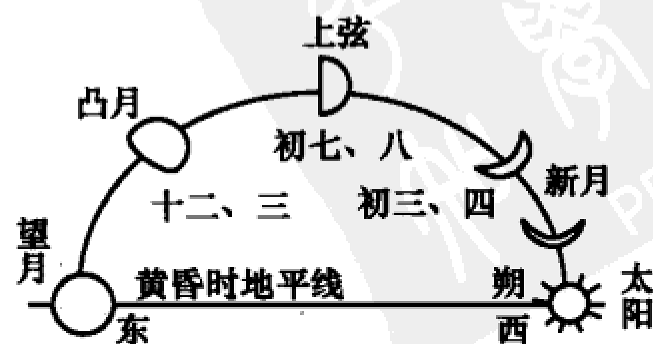


图 1.1.14　农历上半月的月相变化

平线上，不同日期有不同的月相和月亮位置。朔时，月球合于太阳（由于白道与黄道不在同一平面，只是方位相合而不在同一直线上，否则就会发生日食），与太阳同升同落，面向地球的又是没有光照的黑暗半球，人们是不可能看见月亮的。随着月球离日东行，月牙渐露，夜幕降临时，可见一弯新月斜挂在西边天空，由于周日视运动，不久即没入地平线下，日期是农历月初。唐诗“楼上黄昏欲望休，玉梯横绝月如钩”（李商隐·代赠），“风回日暮吹芳芷，月落山深哭杜鹃”（李群玉·黄陵庙）描写的就是这种月相。至初七、初八，日月相距 90°，月相上弦，日落时，半个月亮正高居南方最高处，弦在左，弓背向右，朝向西天的太阳。随着夜色渐浓，弦月也逐渐偏西，至月落地平线的时候，太阳正在地下最深处，恰为子夜时分。著名唐诗“月落乌啼霜满天，江枫渔火对愁眠。姑苏城外寒山寺，夜半钟声到客船”（张继·枫桥夜泊），描写的就是这种情景：月落，夜半，月相上弦。上弦过后，日落时的月亮越来越偏向东方，亮的部分也越来越大，左边的弦线鼓起，称为凸月。至十五、十六，日月相距 180°，月球朝向地球的一面整个被太阳照亮，日落西山时，一轮明月即从东边地平线上冉冉升起，子夜到达中天，至曙方落，整夜都在天上，是为望。“月上柳梢头，人约黄昏后”（宋·欧阳修·生查子）是望月初升的写照，而“采莲去，月没春江曙”（唐·李康成·采莲曲）是望月西沉的描述。

图 1.1.15 所示是农历下半月黎明所见的南半天空，太阳在东边地平线上即将升起。望月经过一个夜晚的行程，即将落入地下。十八、十九的凸月，这时运行到西南天际，不等落山即隐没在晨光中。廿二、廿三的下弦月，黎明时在南方最高点，弦在右，弓背向左，指向正欲东升的朝阳。它从东方升起的时刻应在 6 小时之前的子夜。那时的情景正是一首民歌唱出的意境：“半个月亮爬上来。”再过几天，至农历月末，月相只剩下弯弯残月，离太阳不远，破晓前出现在东方天空，弓背指向左下方已等在地平线处的太阳，晨光曦微之中虽升起不久，也只能逐渐悄然隐退了。曾倾倒过无数骚人墨客的宋词名句“今宵酒醒何处？杨柳岸，晓风残月。”（宋·柳永·雨霖铃）描述的残月风情，宛如一幅清新的图画：晨光未露，河岸凄清，微风吹拂，柳丝飘摇，一钩残月低挂在东边天际。

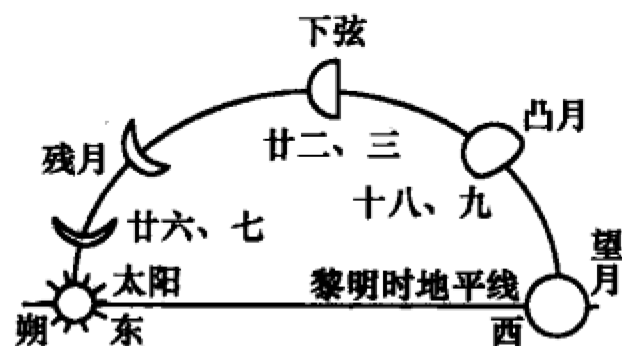


图 1.1.15 农历下半月的月相变化

月相变化，本是简单的自然现象，但那银辉泻地的月光，曾引发人间多少思绪缠绵。关于月相的描述经常出现在文学艺术作品中，变化万千。那些意境高雅，月相、见月时间和方位描写准确的作品，使天上的景物和人间的感情自然地融合在一起，往往成为千古传诵的名篇。

“明月几时有？把酒问青天。”（宋·苏轼·水调歌头）青天不语，让我们来

回答。月儿最明是月地距离最近又适逢望月的时候。由于月球绕地球公转的轨道是椭圆，再加上太阳和其他大行星的一些干扰因素，月球到地球的距离在356 400至406 700千米之间变化，所以我们看见的月球圆面直径变化在1与0.88之间。俗话说“十五不圆十六圆。”发生“望”的时刻，不一定在十五，也不一定在夜间；十六、十七乃至十四都有可能。请看图1.1.16，因为月球在椭圆轨道上运动，速度有快有慢。如果朔时月球在图中轨道下方，从朔到望跨过近地点，运动速度快，所需时间较短，也许不到十五月亮就圆了；如果朔时月球在图中轨道上方，从朔到望跨过远地点，运动速度慢，所需时间较长，须等十六甚至十七月亮才会圆。影响月明程度还有一个因素是，月、地、日三者位置接近直线与否：真的在一条直线上将发生月食，偏离直线稍远，反射阳光不够充分。当然还有天气好坏和大气透明度的影响。所有条件都凑在一块：月既望，又在近地点，极接近直线，天气又十分晴好，没有城市烟尘或光害的干扰，我们看到的才是最大最圆的明月。但这是非常难得的。一般而言，“月到中秋分外明”，未必如此。

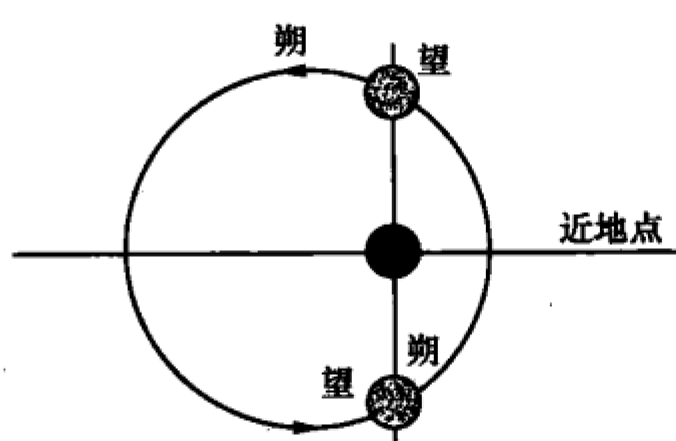


图1.1.16 从朔到望的时间长短有较大变化

1.1.6 地球自转在地球上留下的蛛丝马迹

人们凭直觉发现不了地球自转，所以才误认为地球静止于宇宙的中心，日月星辰绕大地转动。根据牛顿力学原理，在一个做匀速直线运动的系统里，不管运动速度有多大，通过任何实验都不可能测知系统是静止的还是在运动着。这样的系统称为惯性系统。地球不是惯性系统，因为地球在宇宙空间里，不是只做匀速直线运动，它有自转和公转。但是，因为自转角速度很小，方向改变极慢，在地球系统内部几乎觉察不到它的自转。经过科学家仔细考察，才能找到一些自转运动的蛛丝马迹。至于公转和更高级别的绕银河系中心的运动，角速度更小，大概永远都不可能从地球本身考察其运动。

地球自转的蛛丝马迹有以下几点。

1. 地球变扁和重力变化

地球自转产生惯性离心力，力的方向垂直于地球自转轴，而不垂直于地面（图1.1.17）。该力在垂直地面方向的分量减轻了物体的重量；水平方向的分量使一切可以流动的物体向赤道集中，导致以平均海平面为准的地球形状变扁。地球两极比赤道扁了大约43千米。重力偏离地心的方向，数值小于引力。地球表

面不同纬度的地方，重力值是不同的。越接近赤道，旋转半径越大，惯性离心力也越大；越接近赤道，离地心越远，引力也越小。在两极重 10 千克的物体，到了赤道只有 9.947 千克，其中因离心力增加轻了 35 克，因引力变小轻了 18 克。精密的地球形状测量和重力测量，都证明了这些数据是正确的。

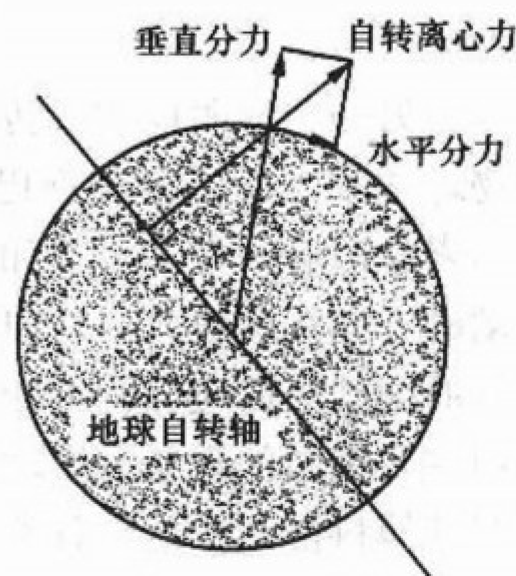


图 1.1.17 地球自转产生惯性离心力

2. *运动物体的偏转*

北半球的河流右岸冲刷比左岸严重，定向行驶的双轨铁路右侧磨损较快，更换勤于左侧。南半球则相反：河流左岸冲刷比右岸严重，铁路左侧磨损较快。这是因为受到一种因地球自转而引起的偏向力的作用。

南北纬度 30°之间，信风（也叫贸易风）产生的原因是：赤道炎热，热空气上升；高纬度地区寒冷，近地面冷空气从高纬流向赤道。可是，北半球的信风不是北风而是东北风，空气的流动有向右的偏转；南半球的信风不是南风而是东南风，空气的流动有向左的偏转。这也是地球自转偏向力的作用。

惯性离心力和地球自转偏向力，在惯性系统中都不是真实存在的力，而是在非惯性参考系中引入的牵连力。它们的存在，反过来证明了地球本身不是惯性系统，而是有转动加速度的系统。地球自转偏向力也叫科利奥里力，只对运动物体才有作用，详细的推导比较复杂，这里只作定性解释如下：

地球自转自西向东。在北半球，当物体由南向北运动时，从转动速度快的地方来到速度慢的地方，因为惯性，要保持较快的速度，因而向东偏转，即向右偏转；由北向南运动时，从转动速度慢的地方来到速度快的地方，同样因为惯性，也是向右偏转。由东向西运动时，抵消了部分自转速度，惯性离心力变小，向南的趋势减弱，因而向北偏转，也是向右偏转；由西向东运动时，增加了自转速度，惯性离心力变大，向南的趋势增强，也同样是向右偏转。在南半球刚好相反，有向左偏转的趋势。向任何方向运动的物体所受到的自转偏向力都是：北半球向右，南半球向左。地理纬度越高的地方，偏向力越大。沿赤道运动时此力消失。

3. *落体东偏与傅科摆*

如果地球不自转，落体应垂直下落（假设不计空气阻力）。但因为地球自转，从高处落下的物体，有向东偏离的现象。因为高处的转动线速度大于低处，为保持惯性，下落后，物体便东偏了。高度越高，纬度越低，东偏越大。在北京的纬度上从 60 米高度落下的物体，东偏约 8 毫米。历史上有人做过这种实验，证明

地球自转。

另一个证明地球自转的著名实验是傅科摆。傅科（J. B. L. Foucault）是法国物理学家，1851年他在巴黎万圣祠（Pantheon，Paris）的大厅里，用67米长的绳索悬吊起一个28千克的重锤，让重锤长时间的自由摆动。仔细观察，发现摆动的方向在缓缓改变，向公众证明地球自转（图1.1.18）。如果地球不自转，物体的摆动平面应保持不变。但由于地球自转偏向力，运动着的摆有向右（南半球向左）偏转的现象，摆动平面就缓缓转动起来了。在北京天文馆的前厅，也有类似的傅科摆。在全球各地，纬度越高，摆动平面的旋转越显著。在巴黎，每小时偏转11.3°，转一圈要32小时。在北京，每小时偏转9.6°，转一圈要38小时。傅科摆的设计，要求摆锤重量大，摆绳长，使周期变慢，空气阻力变小，摆动时间延长。否则，等不及观察到偏转，摆动就停止了。

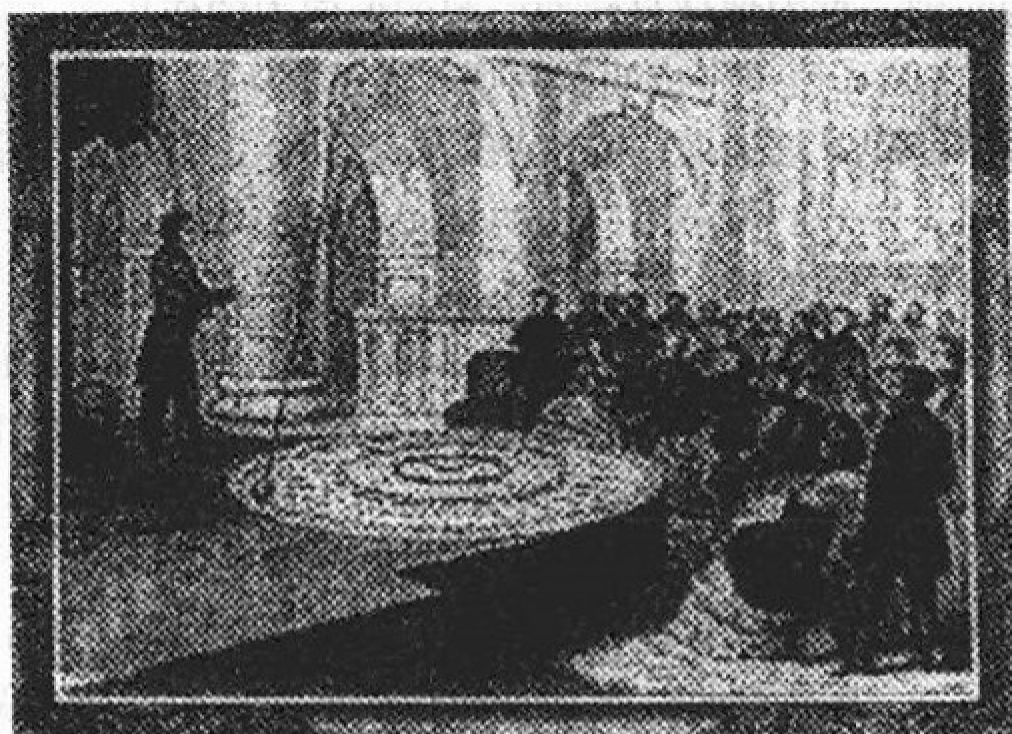


图1.1.18　证明地球自转的傅科摆

1.2　太　阳　系

1.2.1　尺度概念

太阳系共有八大行星，166个卫星，还有一些矮行星和其他小天体，处于主宰地位的当然是太阳。太阳的质量占整个太阳系总质量的99.86%。

太阳系中的尺度通常以天文单位为单位。天文单位的严格定义是："一个假想的、质量为零的无摄动行星，公转周期为365.256 898 326 3历书日的椭圆轨道的半长轴。"这个定义对于非天文专业人员来说未免太复杂太难理解了。我们只需知道，天文单位是地球到太阳的平均距离，或地球公转轨道的半长轴也就够了。它的长度约为1.5亿千米。1976年国际天文学联合会天文常数系统所取的

值为

$$1\text{ 天文单位} = 149\ 597\ 870\text{ 千米}$$

在天文常数系统中，天文单位是一个导出常数，因为它是从基础常数“天文单位距离的光行时”τ_A 计算来的，τ_A 就是光走过一个天文单位所需要的时间，是通过对太阳系天体用雷达测距方法得到的。在 1976 年的国际天文学联合会天文常数系统中，$\tau_A = 499.004\ 782$ 秒。光从太阳传到地球大约需要 8 分 19 秒，从太阳传到太阳系最外层的行星——海王星约需 4 小时 09 分。海王星距离太阳约 30 个天文单位或约 45 亿千米。

为了比较具体地给出太阳系的尺度概念，我们简略地列出各大行星的直径、到太阳的距离（详细的数据见本书附录 6）以及按 1∶10^8的比例缩小的尺度数据示于表 1.2.1 中（为了比较，将已经不算大行星的冥王星也列于表中）。水星、金星、地球、火星体积和质量都较小，有固体外壳，没有光环，卫星很少，称为类地行星；木星、土星、天王星、海王星体积和质量都较大，没有固体外壳，都有光环，卫星很多，称为类木行星。（光盘图 1.2.1 类地行星大小比较模型；光盘图 1.2.2 类木与类地行星大小比较模型；光盘图 1.2.3 太阳与行星大小比较模型）。

表 1.2.1 太阳系尺度简表

星 体	直径/千米	至太阳的距离		缩小 1 亿倍的直径/厘米	缩小 1 亿倍的至太阳的距离/千米
		百万千米	天文单位		
太阳	139 万			1 400	/
水星	4 872	58	0.39	5	0.6
金星	12 105	108	0.72	12	1.1
地球	12 756	150	1.00	13	1.5
月球	3 476	/	/	3	距地球 3.8 米
火星	6 786	228	1.52	7	2.3
木星	143 760	778	5.20	144	7.8
土星	120 417	1 427	9.54	120	14
天王星	52 300	2 870	19.18	52	29
海王星	49 493	4 497	30.06	49	45
冥王星	2 551	5 900	39.44	2.3	59

从太阳到海王星，所有天体差不多都在一个扁平的空间系统中。海王星轨道半径 45 亿千米，只偏出中央平面 1.4 亿千米。相当于一个直径 1 米的大圆饼，厚度只有 3 厘米。海王星以内的大行星和较大的卫星们，都处在这个圆饼形的空间范围之内。已经不算大行星的冥王星是 1930 年发现的，体积比月亮还小，质量只有水星的 1/25。它到太阳的距离是地球到太阳距离的 39 倍，它的轨道偏出大圆饼上下各 20 厘米。从它那里反射的太阳光，再传回地球，已经非常微弱，

其亮度只相当于 700 千米远处的一支烛光。冥王星绕太阳公转一圈需要 248 年，从发现到现在，还没有转到 1/3 圈。冥王星的轨道偏心率也比较大，以至于一部分冥王星轨道在海王星轨道里头。有时候冥王星到太阳的距离比海王星还近，1979 年到 1999 年就是这样。当然，不必担心海王星与冥王星会有相撞的危险，因为它们的轨道不在一个平面上，二者没有实际的交点。冥王星其实不属于大行星的行列，而是遥远的大行星疆界以外众多小天体家族的成员（详见 4.1 节）。

除了行星、卫星、矮行星、彗星这些密集形态的天体之外，太阳系内还存在着辐射带、磁层和太阳风这些连续形态和离散的粒子形态的物质。地球周围的辐射带是地球磁场俘获的高能带电粒子带，这些粒子在地球磁场作用下沿磁场线运动，并不断辐射出电磁波。辐射带的范围沿赤道方向延伸至 5～6 个地球半径处，南北两极上空没有（见图 1.2.4）。地球周围的磁层是呈彗星状的地磁场区域（见图 1.2.5）。

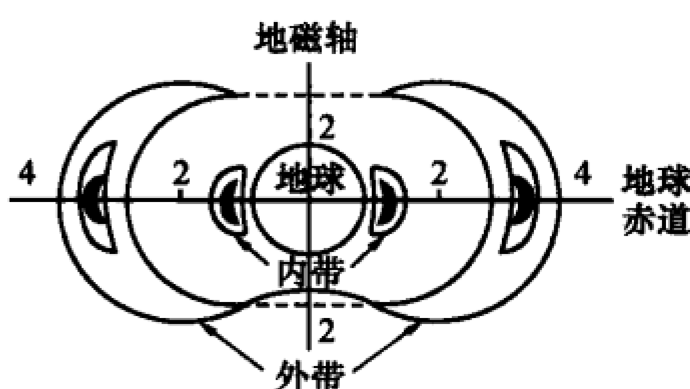


图 1.2.4　地球辐射带

随着地球公转，这个区域周期性地改变着在太空的位置。迎着太阳方向的磁层顶距地面 5～10 个地球半径；背着太阳的方向，磁层尾延伸长达 100～200 个地球半径，截面直径约 40 个地球半径。磁层像一道防护林带阻挡着太阳风吹向地球的大部分高能粒子，使地球上的生命免遭伤害。太阳系其他行星周围也有类似的磁层存在。

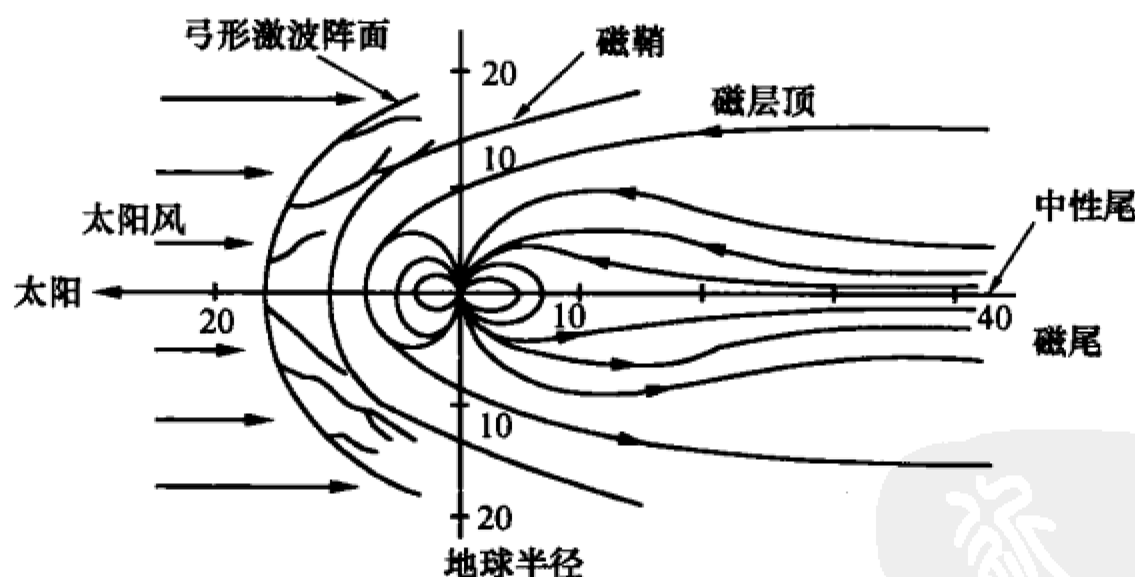


图 1.2.5　地球磁层

太阳风是太阳向行星际空间抛射的高温、高速、低密度的等离子体粒子流，最远可能达到距太阳 100 个天文单位处。地球轨道附近太阳风风速约 450 千米/秒，每立方厘米所含粒子数为 1～10 个。太阳风中的少量粒子穿过地球磁层屏障，沿地球辐射带的空缺区到达两极上空，同电离层中的大气原子和分子碰撞，使其受激而发光，便形成了地球极地的独特景观——极光。极光千变万化，有时像

飘逸天际的云朵，有时像横空出世的彩虹，更多的时候像高悬天宇的巨大帷幕，发出幽幽的蓝绿色荧光（光盘图 1.2.6 加拿大安大略湖畔的极光；光盘图 1.2.7 美国阿拉斯加的极光；光盘图 1.2.8 南极中国中山站上空的极光；光盘图 1.2.9 中国黑龙江漠河的极光；光盘图 1.2.10 加贺谷穰笔下的极光）。

1.2.2 太阳

太阳是太阳系唯一的恒星，唯一的能源基地。太阳的直径约为 140 万千米，质量 2×10^{30} 千克，含氢 71%，氦 27%，其他元素 2%，主要为氮、氧、碳和各种金属，平均密度 1.4 克/厘米^3。太阳的分层结构见图 1.2.11。从中心向外依次分为六层：①核反应区。其范围占太阳半径的 1/4，质量占一半以上，是太阳的产能区，99%的太阳能量集中于此。产能机制是氢聚变为氦的热核反应。核反应区的中心温度高达 1 500 万开，压力 30×10^{15} 帕（相当于地球表面大气压力的 3 000 亿倍），密度 160 克/厘米^3。②辐射区。范围从 1/4 到 4/5 太阳半径。核反应区产生的能量以 X 射线和 γ 射线的形式经由辐射区向外传送。辐射区的物质吸收辐射再发出辐射，不断地将能量向外转移。③对流区或对流层。厚度约 0.28 太阳半径。太阳物质在对流区急速地上下翻滚，形成湍流，以物质对流的方式向外传送能量。对流区是不透明的，不能通过仪器对之及内部更深的层次进行直接观测。④光球层。它是对流区的顶层，厚度只有 500 千米，是太阳的可见表层。太阳半径就是指此层到太阳中心的距离。光球是我们凭肉眼和天文望远镜看到的太阳圆面，它是太阳表面相对浓密的大气底层，温度 5 770 开，向外传播的太阳可见光绝大部分是从这里发出的。由中心区产生的 X 射线和 γ 射线辐射，在传送途中与太阳各层物质反复进行吸收、发射、再吸收、再发射的过程，频率逐步降低，至光球层再向外辐射时，能量的 99.9%已降为 200～10 000 纳米波段范围的辐射，包含全部可见光和少量红外线、紫外线辐射。⑤色球层。厚度为2 000～10 000 千米，外缘参差不齐，物质稀疏而透明，平时看不见，只有在日全食时才能直接观察到。它包裹在全食太阳周围，看似一层薄薄的玫瑰红色的辉光。此层能量约为光球层辐射能量的几千分之一。⑥日冕。这是太阳最外层的更加稀疏的大气。在日全食时可以看见它像戴在太阳上的一顶帽子，发出银珠色的光芒，延伸出几倍太阳直径范围，形状不规

图 1.2.11 太阳的分层结构

则，太阳活动激烈时接近圆形，太阳活动平静时接近椭圆形。太阳物理学家把辐射可以到达地球从而可借助测量直接获得它们信息的光球、色球和日冕称为太阳大气；而把对流层、辐射区和核反应区等看不见的部分称为太阳内部，或太阳本体。

太阳黑子和“米粒组织”都在太阳光球层上。黑子是光球表面因温度相对较低而显得“黑”的局部区域，经常成群出现，大小差别很大，大的黑子比地球直径还要大。黑子是变化的，有时出现，有时消失，平均寿命约数月。黑子多的时候是太阳活动激烈的时候图（光盘图 1.2.12　成群的太阳黑子)。人类最早记录太阳黑子的是我国古代典籍，如《汉书·五行志》中“有黑气大如钱，居日中央”的记载。《周易·五十五卦》“日中见斗”、“日中见沬”和传说中的“日中乌”可能就是指太阳黑子。古人可在日出或日落时直接用肉眼见到太阳黑子，也常用“盆油观日斑”的办法来观察太阳黑子。米粒组织是太阳内部对流气团冲击光球产生的图样，必须用望远镜才能观测到它的精细结构。每一颗米粒组织的直径为 700～2 000 千米，而且不断翻滚变化，存在寿命只有十几分钟。它是太阳表面物质和能量上下对流的强烈表现（光盘图 1.2.13　黑子和米粒组织)。这里提醒读者，在任何时候，都不要用任何尺寸的望远镜直接瞄准太阳，以免使眼睛受到伤害。

日珥是从色球层喷射出来的，像红色的火焰，大小不一，形态多样，有喷泉状、拱桥状等，一般高度可达几万千米（光盘图 1.2.14　1999.7.24. 太阳大日珥；光盘图 1.2.15　2002.7.1. 太阳大日珥；光盘图 1.2.16　2008.9.29. 太阳大日珥)。耀斑是色球层突然出现的剧烈爆发现象。一个中等大小的耀斑能量相当于1亿颗氢弹爆炸的能量（光盘图 1.2.17　太阳耀斑)。有时还会出现日冕物质的大量抛射，直到几倍太阳直径以外（光盘图 1.2.18　1998.6.2. 太阳日冕物质抛射；光盘图 1.2.19　2002.1.4. 太阳日冕物质抛射)。太阳上这些剧烈的活动会使地球大气电离层受到干扰，往往造成短波无线电通信中断，海上和空中的导航系统以及导弹的制导系统失灵；也会使地球磁场受到干扰，出现地球磁爆；还会使宇宙飞船和高空飞机的安全受到威胁，输电网络和输油管线受损，对气象和水文以及人类健康也有一定程度的影响。这方面的研究工作称为“日地关系”和“空间天气预报”研究。

太阳的辐射可分为电磁波辐射和粒子辐射两种，来自光球的 300～3 000 纳米的电磁波辐射占总辐射量的 97%，主要是可见光和少量红外线、紫外线光。色球和日冕是太阳紫外线和 X 射线辐射源。粒子辐射又称太阳风，主要成分是质子、电子和 α 粒子，大部分是从日冕中分布着的一些深不可测的“冕洞”里吹出来的。一种说法认为，太阳风就是动态的日冕。这种广义的日冕可以一直延伸到超过日地距离很远的地方。太阳直径是地球直径的 109 倍，但它的大部分区域

几乎都是“空无一物”的。日冕和色球层同真空差不多，光球的稀薄程度相当于地球最高层的大气。太阳物质主要集中在太阳深部，从 1/2 半径向里，只占总体积 1/8 的中心部分占有总质量 90%以上的物质。太阳温度从光球向中心区增高，从 5 770 开增高到 1.5×10^7 开，但从光球向外，也随大气层高度而增高，光球上空 2 000 千米处增至几万开，色球层顶面达到几十万开，到日冕区竟高达几百万开。这种反常增温的情况是太阳物理学中令人困惑的问题之一。一种说法认为，是太阳对流层中的各种波（如声波和重力波等）传播到太阳大气层中，因耗散而转换为热能，类似微波炉加热食物的原理，使密度极低的高层大气加热到很高的温度。

太阳辐射的总能量到底有多少？可以从太阳常数加以计算。太阳常数就是在地球大气层外，单位面积上的日照功率。它是可以用仪器直接测量的。现代的测定值为 $\tau=1.367\times10^3$ 瓦/米^2。据此可以计算出太阳辐射的总功率是 3.845×10^{26} 瓦。地球收到的太阳辐射能量只占 22 亿分之一的份额，大气层还要反射和吸收掉一半，剩下的部分传至地面，总量相当于全球发电总功率的 10 万倍。如此巨大的辐射能量，是以消耗太阳自身的质量为代价换来的。在太阳核反应区，质量消耗的程度是 400 万吨/秒。消耗自己，照亮他人，是太阳和一切恒星的高贵品质，是行星上的生命赖以生存的能量源泉。年复一年，日复一日，每分每秒，如此巨大的消耗，太阳能经受得住吗？天文学家的测量和计算告诉我们，太阳能够经得住这样的消耗至少 100 亿年。太阳已有 50 亿年的历史，还能继续照耀我们 50 亿年以上，这与人类的文明史区区数千年相比较，真是来日方长啊！

计算太阳总辐射功率和估算太阳寿命并不复杂，请看如下推导：

太阳能量是各向同性的，地球大气层表面收到一份太阳辐射能量 $\tau=1.367\times10^3$ 瓦/米^2 的同时，太阳也向其他所有方向辐射同样的能量。在以太阳为中心，以天文单位为半径的球面上，每一个单位面积上都收到同样份额的辐射能量。因此太阳辐射的总功率为

$$E_{\odot}=4\pi\,\text{天文单位}^2\tau=3.845\times10^{26}\ \text{瓦}$$

地球收到的部分为

$$\pi R^2/4\pi\,\text{天文单位}^2\approx1/(22\times10^8)$$

式中，R 是地球半径。

太阳产能机制是 4 个氢（H）原子核聚变为 1 个氦（He）原子核的热核反应。氢的相对原子质量是 1.007 8，氦的相对原子质量是 4.002 6，电子的质量忽略不计，氢→氦反应后质量损耗的比率为

$$\frac{4\times1.0078-4.0026}{4\times1.0078}=0.709\%$$

太阳辐射能是这部分损耗的质量按爱因斯坦质能转换公式：$E=mc^2$ 转换而来的。由太阳辐射总功率可以换算太阳质量损耗的速率为

$$\Delta M_{\odot}=\frac{E_{\odot}}{c^2}\approx4.29\times10^9\ \text{千克}/\text{秒}$$

(每秒约 400 万吨)。太阳总质量 $M_{\odot}=2\times10^{30}$ 千克，其中氢占 71%，全部氢投入反应，可供损耗的质量为

$$M'_{\odot}=M_{\odot}\times71\%\times0.709\%$$

能维持的时间为

$$T=\frac{M'_{\odot}}{\Delta M_{\odot}}=0.23\times10^{19}\text{ 秒}\approx700\text{ 亿年}$$

在长期的演化过程中，太阳内部。实际的核反应过程比较复杂，不能一直维持如此高的产能效率，而且不等氢原子核全部消耗完毕，太阳上的热核反应就要有大起大落的变化。据太阳物理学家的估算，太阳的实际寿命约为 100 亿年。

太阳黑子的统计数量是太阳物理观测的一个重要内容。国际上通行一种“黑子相对数”的统计方法，它是 1849 年瑞士苏黎世天文台首创的。它的定义为

$$R=K(10g+f)$$

式中，R 是黑子相对数，g 是日面上观测到的黑子群数目，f 是观测到的各个群中单个黑子的总数，K 是换算因子。K 与所用仪器、观测技术、观测方法和天气情况有关。苏黎世天文台的 $K=1$，其他天文台的 K 通过与苏黎世天文台的观测结果比较而确定。多年的观测统计发现，黑子数有平均 11 年的变化周期。在每一周期中，太阳黑子极盛的年份称为太阳活动峰年。太阳黑子周期同一系列地球物理、气象、水文等现象有密切的联系，是“日地关系”研究的重要内容。国际上统一约定，从太阳黑子相对数最少到下一次最少的时间间隔称为一个太阳活动周期，从 1755 年 3 月开始至 1766 年 5 月止的 11 年为太阳活动第一周期。延续到现在，从 2007 年开始，进入第 24 个太阳活动周期。太阳活动周期的长度，最短的 9 年，最长的 13.6 年。在一个太阳活动周期内，黑子群出现的规律，是先从日面上下两部分（高纬度地区），逐渐向中间（低纬度地区）转移，在赤道上汇合并趋于消失。下一个周期又从高纬度地区开始。在记录黑子出现规律的图表上，可以见到以 11 年为周期的蝴蝶形图样（图 1.2.20)。相邻两个周期的黑

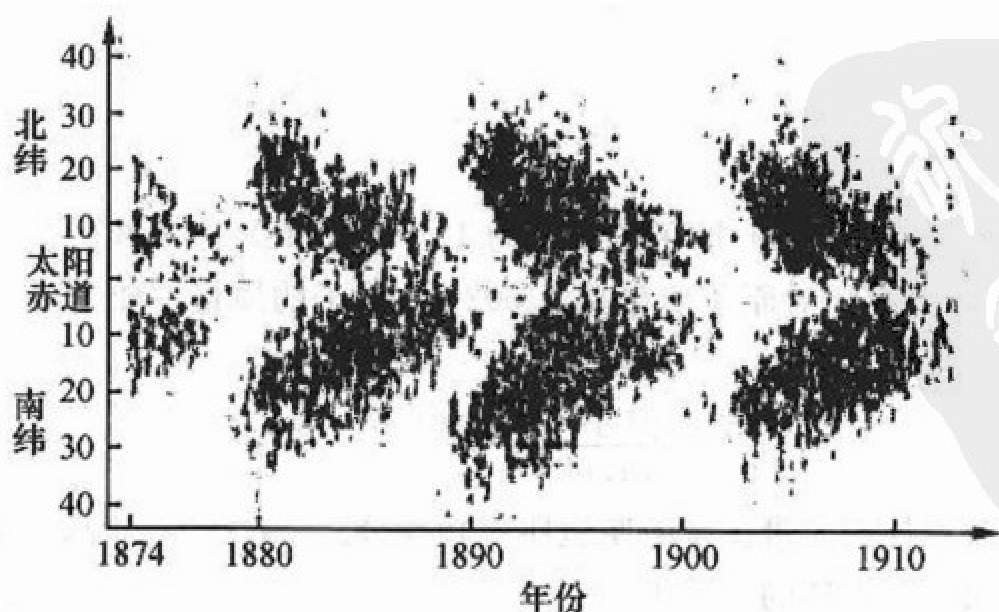


图 1.2.20　太阳黑子蝴蝶图

子群磁场极性刚好相反，并轮流交替。因此按磁场变化的情况来看太阳黑子的活动周期，应是 22 年，称为太阳磁场周期。受国际天文学联合会的委托，全球各天文台观测到的太阳每日黑子相对数汇总到苏黎世天文台，经整理发表在该台出版的《太阳活动季刊》上。中国测出的每日黑子相对数也刊载于国家天文台每月出版的《太阳地球物理资料》中。

1.2.3 八大行星

八大行星中，天王星、海王星是肉眼看不见的。水星因为离太阳很近，总是追随在太阳周围同升同落，所以难得看见。人们常见的是金、火、木、土四个行星。它们的识别特征是：①都在黄道附近，也就是离太阳运行的轨道不远。②亮度一般比恒星亮。金星特别亮，超过所有的恒星，有黄金一样的颜色和光亮，通常黄昏后出现在西方，黎明前出现在东方；火星颜色发红；木星是橙黄色，亮度仅次于金星；土星比木星略暗。③恒星光芒闪烁，而行星的光比较稳定，不闪烁。这是因为恒星仅是一个光点，而行星有一块面积，由地球大气抖动产生的闪烁效应被平衡掉了。如果熟悉星座的话，更可靠的判别方法是，只要看到黄道附近的星座里多出一颗亮星，那就是行星了。用小型业余级望远镜可以看到金星有盈亏（水星、金星都和月亮一样，有盈亏变化）。土星有光环，木星有 4 颗伽利略卫星。土星的光环最早也是伽利略看到的，但因为赶上光环投影最窄的时期他没有辨认出来。土星光环的发现者是荷兰天文学家惠更斯（C. Huygens），他同时也是物理学家和数学家。现代地面和空间观测发现木星、天王星和海王星也有环。天王星环是 1977 年在它遮掩恒星时被观测发现的，木星环和海王星环是旅行者号飞船发现的。

水星表面布满了大大小小的环形山，只有极其稀薄的大气，大气压为地球的 1 万亿分之一。由于自转很慢，一昼夜有 176 个地球日那么长，相当于两个水星年。昼夜温差达 600℃以上。由于自转轴直立而没有倾斜，不存在一年四季的变化（光盘图 1.2.21　2008 年 10 月 7 日信使号拍摄的水星）。

金星堪称地球的姊妹，因为它的质量和体积都和地球差不多。但金星的大气层非常稠密，大气压比地球大 90 倍。光学望远镜无法看透浓云密雾掩盖下的金星真面目（光盘图 1.2.22　浓云密雾掩盖下的金星）。美国发射的麦哲伦号金星探测器，通过雷达探测了 97%以上的金星表面：到处都是炽热的火山地貌，最高峰 12 000 米。金星上的一昼夜长 117 天，一年长 225 天。大气成分 97%是二氧化碳，其余是氮、氩、氦和硫酸蒸气，温室效应非常严重，温度高达 480℃，昼夜温差很小。自转轴也基本上是直立的，不存在一年四季的变化。金星自转方向与公转相反，太阳和所有天体都西升东落。金星这位地球的姊妹，空有黄金般璀璨的外表，实为不容任何生命存活的炼狱（光盘图 1.2.23　炼狱般的金星；

光盘图 1.2.24　炼狱般的金星表面）。

火星比地球小，质量只有地球的十分之一，大气稀薄，大气压不足地球的百分之一。大气成分95%是二氧化碳，其余是氮、氩和少量水蒸气。火星与地球相似之处是它的自转周期24小时37分和自转轴倾斜25.2°，因而有和地球一样的昼夜长短变化和一年四季的变化，不过火星的一年有680多天。昼夜温差和年温差都很大，变化于+20℃与−139℃之间。望远镜中看火星，有一年四季的颜色深浅变化，特别明显的是两极地区的白色极冠，冬日扩大、夏季消融。火星上有高山、盆地、平原、沙丘、陨击坑和干涸的河床。最高峰奥林匹斯山高25 000米。一直以为极冠的主要成分是二氧化碳干冰，但一些对南极冠的新探测表明也许水冰也占一定的成分（光盘图 1.2.25　火星极冠）。火星的土壤富含红色的氧化铁，常有持续数月的大风暴把红壤卷上高空，使天空呈桃红色。2004年以来对火星探测的结果，认为火星曾经有过大量的水，一些照片显示大水冲刷过的痕迹（光盘图 1.2.26　火星上的水流痕迹）。

火星有两颗卫星，体积都很小，形状奇特，距离火星较近。两颗卫星的公转方向相同，但火卫一的公转比火星自转快，火卫二的公转比火星自转慢，所以从火星上看，火卫一西升东落，火卫二东升西落（光盘图 1.2.27　火卫一伏波斯；光盘图 1.2.28　火卫二代莫斯）。火星上空虽有两个月亮的奇观，但这两个月亮反照率都很低，发光微弱，视直径分别是地球月亮的1/2和1/10。

木星是太阳系行星家族中的巨无霸。它的肚子里能装得下1 300个地球，质量是其余7个行星总和的两倍半（光盘图 1.2.29　卡西尼号拍摄的木星）。木星为液态氢组成的海洋包围着，海深1.6万千米。其下是液态金属氢和氦，深4.4万千米。岩石组成的内核直径只是地球直径的1.6倍（光盘图 1.2.30　木星内部结构）。木星自转周期9.8小时，高纬地区比赤道地区自转滞后5分钟，如有固体外壳就不可能有这种情况。木星的大气层厚约1 000千米，82%是氢，17%是氦，其余是甲烷和氨，不含水蒸气。由甲烷和氨形成的云霾布满木星上空，望远镜看到的条带状是它的云层，而不是其液体表面。著名的大红斑有两个地球大，是由含磷化合物组成的气体旋涡，从伽利略时代发现以来，历400年未曾平息（光盘图 1.2.31　伽利略号拍摄的大红斑）。

土星是肉眼所见最远的行星，它的内部结构与木星类似。土星是最“轻”的行星，密度只有水的0.69，是唯一能“漂浮”在水面上的大行星。土星也是“最扁”的行星，赤道半径与极半径之比是1∶0.9。土星的大气层与木星类似，条带状的云层覆盖行星表面。土星最显著的特征是它美丽的光环，用望远镜看过土星的人一定会留下终生难忘的印象（光盘图 1.2.32　美丽的土星）。光环由大大小小的冰块组成，越靠近内层，冰块的粒度越小（光盘图 1.2.33　土星光环由大大小小的冰块组成）。土星拥有60颗卫星（光盘图 1.2.34　土星的卫星

们)。土卫六泰坦是太阳系第二大卫星，也是唯一有浓密大气层的卫星。大气成分很接近原始地球的情况。可能有液态碳氢化合物的海、湖乃至河流，而河床是水冰。那里是否有生命物质是人们特别感兴趣的问题（光盘图 1.2.35　泰坦上的碳氢化合物冰块）。

天王星和海王星有许多相似之处（光盘图 1.2.36　旅行者号拍摄的天王星；光盘图 1.2.37　旅行者号拍摄的海王星)，天王星体积略大而质量略小，自转周期也差不多（约 18 小时)，但天王星的自转是逆向的。它们都有液氢和液氦的海洋和浓密的大气，也都有光环。不同的地方是自转轴倾斜的角度：海王星倾斜约 30°，有与地球相似的一年（165 个地球年）四季变化；而天王星倾斜近 90°，是唯一一个“躺在”轨道面上自转的大行星。天王星的全球大部分地区“一年”（84 个地球年）之中都有最极端的昼夜长短变化：从连续好多年的全天黑夜到为期几年的有一点蒙蒙曙光；每 18 小时有昼有夜的日子不长，又进入连续好多年的永昼；再经为期几年的黄昏景色和有昼有夜的日子，重新回到全天黑夜，84 年重复一次（详见 2.6.3 小节)。

八大行星的轨道参数及物理参数列于附录 6。

1.2.4　太阳系的物质分布

太阳系的物质分布有 6 重界限。

第 1 重是水、金、地、火 4 颗类地行星，空间范围 0.39～1.52 天文单位，体积和质量都比较小，密度较大，温度较高，有坚硬的岩石外壳，没有光环，一共只有 3 颗卫星：地球 1 颗，火星 2 颗。

第 2 重是小行星带，分布着几千万个以岩石为主要成分的小行星，空间范围 2.17～3.64 天文单位，但总质量小于千分之一个地球（详见 4.5 节)。

第 3 重是木、土、天、海 4 颗类木行星，空间范围 5.2～30 天文单位，体积和质量都很大，密度较小，温度较低，没有坚硬的岩石外壳，大气层下面是液态氢组成的海洋，都有光环和许许多多的卫星。冥王星曾是太阳系九大行星中的一员，依照 2006 年国际天文学联合会的决议，它被改属于另一重天体（详见 4.1 节)。

第 4 重是以冥王星为首的又一个小天体环带——柯伊伯带，空间范围 30～50 天文单位，有 10 亿至 100 亿颗以冰为主要成分的小天体绕太阳公转。个别沿狭长轨道来到太阳和地球附近的便成为长尾巴的彗星（详见 4.5 节)。

第 5 重是太阳风粒子能到达的区域，最远到 100 个天文单位，完全笼罩着所有大行星和柯伊伯带天体，呈球状分布，太阳位于中央。太阳物理学家称这个大球为“日球”(heliosphere)，也叫“太阳风层”，这是太阳电磁力场所能到达的范围，也是太阳系物质又一层重要的界限（光盘图 1.2.38　太阳风粒子示

意图）。

第6重也是最后一重在离日球边界更远的地方，直到离太阳3万～10万天文单位的区域，叫奥尔特彗星云，分布着数千亿颗与柯伊伯带天体类似但质量更小的彗星，总质量与地球质量相当（光盘图1.2.39　柯伊伯带和奥尔特彗星云示意图）。

第3重海王星轨道以外的太阳系天体统称为“海外天体”（trans-neptunian object，TNO，详见4.1节）。如果说前三重环带都接近扁平系统，那么后三重却是更接近空间球形分布了。

如果将大行星们的领地缩小为直径1.2千米的城堡，城堡中央有直径20厘米的火球——太阳。大行星们稀稀落落地环绕在太阳四周：4个小的在里层，只有毫米大小；4个大的在外层，也不过是1～2厘米大小的颗粒。里外两层之间，小行星们像一圈细碎的小粉末。柯伊伯带天体如散乱的尘埃，簇拥在城堡外围，散布在宽约400米的环带中。笼罩城堡的日球，飞舞着无数个太阳风粒子，直径比城堡直径大3倍。远方的奥尔特彗星云如冰晶雾霰，延伸到方圆4 000千米处。如果按比例尺画太阳系物质的分布图，将直径1.2千米的城堡画在我国大陆国土中央，那么中国大陆的全部领土都还在太阳系的物质范围。

1.3 恒星世界

1.3.1 数量和名称

“天阶夜色凉如水，卧看牵牛织女星。”（唐·杜牧·秋夕）每当夜幕降临，天气晴好时，闪烁的繁星格外引人注目。众星之中，除少数几个行星之外，绝大多数都是恒星。恒星都是和太阳一样的天体，只是因为距离十分遥远，才显得只有荧荧寒光。在远离城市的地方，暗夜晴空，满天繁星密密匝匝，似乎数不胜数，多得不得了，其实并不是这样。天文学家将所有观测到的恒星画成星图，列成星表，并按其亮度分成等级，再一一统计其数目。即使在最晴朗的夜晚，所有肉眼能见的星也只有3 000颗左右，加上地球另一半所见的天空，全天苍穹一共有6 000多颗。

恒星的亮度等级称为星等，沿袭古希腊人的作法，用数字表示，星越亮，星等数越小。最亮的天狼星是－1.46等，记为$-1^m.46$。肉眼能见的最暗的星是$6^m.5$，织女星$0^m.03$，北极星$2^m.12$。全天按星等统计的恒星数目如表1.3.1。比$6^m.5$亮的恒星有6 974颗。银河系的恒星总数大约有3 000亿颗，人类能观测到的只是其中很少的一部分。

表 1.3.1 恒星的数目

星 等	星 数	星 等	星 数
$<1^m.5$	21	$5^m.5\sim6^m.5$	4 840
$1^m.5\sim2^m.5$	45	$7^m.5\sim8^m.5$	4.5 万
$2^m.5\sim3^m.5$	134	$9^m.5\sim10^m.5$	40.7 万
$3^m.5\sim4^m.5$	458	$11^m.5\sim12^m.5$	324 万以上
$4^m.5\sim5^m.5$	1 476	$15^m.5\sim16^m.5$	1 亿以上

恒星的命名有几种作法，最通用的是划分星座的命名法。它将全天空划分为 88 个星座，每个星座各占一定的天空区域，区域有大有小。星座名称大多沿用古希腊人的叫法，以神话中的人物或动物命名。南天的一些星座是 17 世纪环球航海以后才取名的，所以出现一些科学技术名词。星座里的星按古人认定的亮度顺序用希腊字母排列命名。如天狼星是大犬座中第一亮星，名为大犬座 α(αCMa)，织女星叫天琴座 α(αLyr)，参宿七叫猎户座 β(βOri) 等（光盘图 1.3.1 猎户星座）。希腊字母用完就用数字或罗马字母排序，如天鹅座 61 (61Cyg)，鲸鱼座 uv(uv Cet) 等。另一种方法是用专门编制的星表编号命名，如 BD+36°2147，GC2104，NGC2632，M31 等。BD 代表德国波恩天图星表，GC 代表美国总星表，NGC 代表星云星团新总星表，M 代表法国梅西叶星表。星表简称后面的数字是某星（有些是星云、星团或河外星系）在该星表中的编号。BD 星表中的+36°表示该星的赤纬是+36°。对一些特别亮的星取有专名，如天狼（Sirius），织女（Vega），北落师门（Fomalhaut）等。中国古代的恒星命名方法是将星空分为若干星官。北极附近的一些星官分属三垣：紫微垣、太微垣、天市垣。沿黄道的 28 个星官称为二十八宿（音 xiù）。每个星官或每宿中的恒星用数字排序。如河鼓二、轩辕十四、参宿七、毕宿五等。河鼓、轩辕是星官名，参、毕是星宿名（本书附录列有相关的资料）。二十八宿中的“心宿三星”，中间那颗心宿二特别明亮，又称大火星，是殷商时代判断季节指导农耕的重要星辰，也称商星。杜甫名句“人生不相见，动如参与商。”意指商星与冬季猎户座中的“参宿三星”此起彼落，永无见面的机会。心宿三星是天蝎星座的一部分，盛夏时位于南天低空，硕大的身躯，弯弯的毒钩，是黄道上的著名星座（光盘图 1.3.2 天蝎星座）。

1.3.2 运动和距离

恒星的“恒”字指的是星座或星官排列成的形象亘古不变。古代星图上画出的模样和现代人看到的没有什么不同，好像是永恒不变的。恒星真的都不运动吗？不是的。恒星也同行星一样有自转和公转的运动。银河系恒星的公转是绕银河系核心的运动。太阳拖带着他的家庭成员——行星、卫星、彗星等，绕银河系

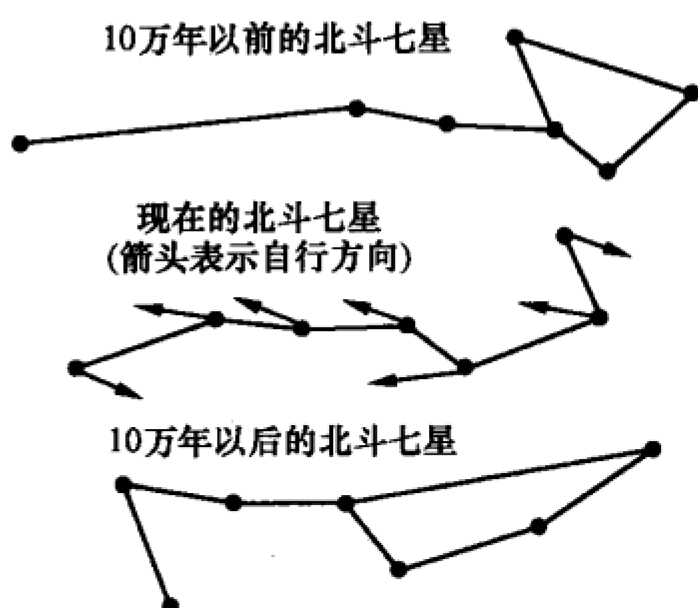


图 1.3.3　北斗七星的变化

核心公转，运动速度为 250 千米/秒，比地球绕太阳公转运动的速度快 8 倍。恒星在银河系中的运动不是整体转动，所以恒星与恒星之间也有很大的相对运动，但比起其间遥远的距离来说是微不足道的。在较短的时间，比如几千年内，是看不出来的。经过非常精密的测量，对相隔很长时间的恒星位置进行比较，恒星之间的相对运动才能显现出来。图 1.3.3 画出了北斗七星在 20 万年内变化的情况。这种变化在天文学上称作恒星自行，详细情况请见 5.2.2。

恒星之间的距离，用我们常见物体的尺度来衡量是很难胜任的。天文上常用的一种尺度单位叫光年，即光走一年所走过的路程。一光年约为 9.5×10^{15} 米。光的速度是 30 万千米/秒，相当于 1 秒钟绕地球 7 圈半。太阳至地球 1.5 亿千米，光只走 8 分钟就到了。而离太阳最近的恒星半人马座比邻星的距离是 4.22 光年，相当于 40 万亿千米。牛郎星的距离是 16 光年，织女星的距离是 26 光年，牛郎与织女的距离也是 16 光年，如果两者通信，无线电波一来一回就需要 32 光年的时间（光盘图 1.3.4　卧看牵牛织女星）。银河系边缘到我们地球有几万光年，那里发生的景象要经过好几万年才能传到我们这里。目前已知以太阳为中心，以牛郎星的距离为半径的空间区域里，一共只有 50 多颗恒星，空间的辽阔可想而知。用光年作天体距离的单位，一是形象直观，二是立即可以知道光从该天体传送到地球需要多长的时间。例如，织女星的距离是 26 光年，我们所看见的织女星是它 26 年前的形象。如果有一天织女星突然消失了，它的光亮仍能继续照耀我们 26 年。

恒星距离的测定是非常困难的，最直接的方法是利用视差。视差是指地球绕太阳公转运动，在不同位置所观测到的恒星位置差异。由于恒星的距离比地球到太阳的距离大得多，这个差异是很小的，最大也不超过 1″，相当于 5 千米以外看一枚分币的张角。自从哥白尼提出日心说以来，很多天文学家都想测出恒星的视差，用以证明地球的公转运动。但 300 年间无人成功，甚至成为哥白尼学说是否正确的一个疑点。直到 19 世纪 30 年代，才有三位天文学家分别测出了 3 颗恒星的视差。他们是：俄国的斯特鲁维（В. Я. Струве）在圣彼得堡测织女星；德国的贝塞尔（F. W. Bessel）在柏林测天鹅座 61 星；英国的汉德森（T. Henderson）在好望角测半人马座 α 星。1837 年、1838 年和 1839 年他们分别发表了所测出的恒星视差值，从此突破了恒星距离无法测定的难关。三人中难度最大的是斯特鲁维，因为织女星视差最小，只有 0″.12，相当于 50 千米外一枚

分币的张角。关于视差和恒星距离测定的详细情况请见 5.1 节和 5.2 节。

1.3.3 体积和质量

如果能测出恒星的直径，就可以计算其体积。先测量恒星圆面所张的角度(称为角直径)，再根据距离才能知道真实的直径。恒星圆面都非常小，最大角直径也不超过 $0''.05$，所以恒星直径的测量是非常困难的。通常使用的方法有：①干涉法。利用光学技术测量来自恒星不同部分的星光之间相互干涉产生的条纹，来测定恒星的角直径。②月掩星法。月亮穿行在恒星之间，某个恒星被月轮挡住的现象称为月掩星。在月轮从刚开始与恒星相切到完全被挡住这个很短的过程中，恒星的亮度有微小变化，用非常灵敏的光电仪器测量这一变化，可以换算出恒星的角直径。③光度法。根据物理定律和恒星的光度及温度数据得知恒星的直径。前两种方法比较可靠，但只适用于较近的恒星，月掩星法还限用于有机会与月亮相遇的恒星。后一种方法可靠程度要差一些。

恒星的直径差别极为悬殊，超巨星直径比太阳大 1 000 倍，白矮星直径只及太阳的几百分之一。天蝎座中红色的心宿二又叫大火星，直径比太阳大 600 倍(光盘图 1.3.5 恒星大小的比较)。猎户座中红色的参宿四直径比太阳大 900 倍，体积相当于 7 亿个太阳。如果把它搬到太阳的位置，那么水星、金星、地球、火星统统都要装进它的肚子里（光盘图 1.3.6 参宿四的射电图像)。仙王座 VV 星直径比太阳大 1 600 倍，超过木星轨道直径。目前已知体积最大的恒星是御夫座 ε（中文名柱一)，直径约为太阳直径的 2 500 倍，体积相当于 150 亿个太阳，把土星的轨道也都包括进去了。比太阳小的恒星也小得惊人，天狼伴星的体积只有太阳体积的 170 万分之一（光盘图 5.4.12)，中子星的体积更小。

恒星的发光本领（也叫光度）差别也特别大，发光本领大的比太阳大 100 万倍，小的只有太阳的 1 万分之一。但恒星的质量差别较小。大的为太阳质量的 100 倍，小的为太阳质量的几十分之一。目前已知质量最大的恒星是离我们 4.5 万光年的人马座 LBV1806-20（光盘图 1.3.7 目前已知质量最大的恒星)，为太阳质量的 150 倍；质量最小的是鲸鱼座 UV 星，它是一对双星，大的一个质量是太阳质量的 8%，小的一个只有太阳质量的 4%，这小的已经失去了作为恒星的资格（天文学中称这类介于恒星与行星之间的天体为褐矮星)。

恒星的体积差别巨大而质量差别较小，好比人的体重彼此差不多，而个头大的像一座大楼，小的像一只蚂蚁。恒星的密度一定差异特别巨大。一些红巨星的密度只有水的几百万至几千万分之一，比实验室里的真空还要空，而白矮星和中子星的密度高达水的几百万倍甚至百万亿倍。恒星的光度差别巨大而质量差别较小，说明能维持恒星正常辐射的时间，即恒星的寿命差别很大，短的 100 万年，

长的1万亿年。恒星品种多样性的特征非常显著。

1.4　银河系及河外星系

1.4.1　银河与银河系

银河是指在无月的晴夜，大气透明度好的地方能看到的横跨天空的乳白色光带，也叫天河。西方称之为奶之路（milky way）。一种传说是，大神宙斯与凡女爱克米拉生子赫克里斯，宙斯趁神后赫拉睡梦时让赫克里斯偷吮赫拉的乳汁以得到神后的法力。赫拉惊醒，盛怒之下推开了正在吃奶的孩子，乳汁洒向天庭，形成乳白色光带——奶之路。伦敦国家画廊有一幅表现此题材的油画，为文艺复兴时代意大利画家丁托莱托（J. R. Tintoretto）所作（光盘图1.4.1　丁托莱托的油画）。银河环绕全天空，跨越25个星座，它们是：天鹅、天鹰、狐狸、天箭、蛇夫、盾牌、人马、天蝎、天坛、矩尺、豺狼、南三角、圆规、苍蝇、南十字、船帆、船尾、麒麟、猎户、金牛、双子、御夫、英仙、仙后和蝎虎。银河各段明暗不一，宽窄不等，最宽达30°，最窄只4°～5°。夏秋之交见到的天鹅、天鹰及天蝎、人马段比较明亮壮观（光盘图1.4.2　北半球夏夜银河；光盘图1.4.3　北半球冬夜银河）。

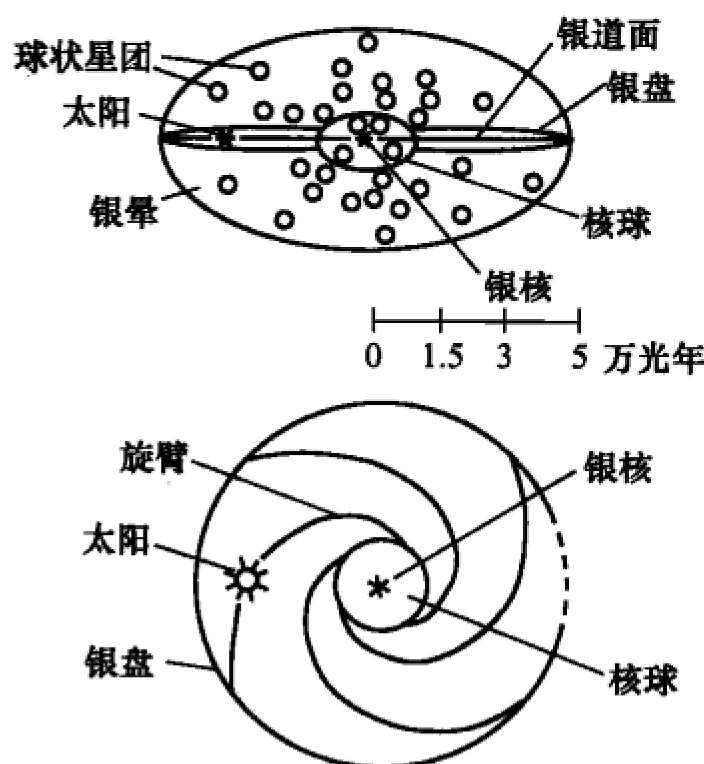


图1.4.5　银河系结构示意图

用望远镜可以分解出银河是由许许多多恒星和星云密集组成的（光盘图1.4.4　天鹅座附近银河中密密麻麻的恒星）。它是一个包含着3 000亿恒星和其他天体的庞大的天体集团在地球上看到的投影，这一天体集团就是银河系。太阳是银河系的一员。银河系的形状像一个扁平的圆盘，太阳系在盘中比较靠边的位置，从这里向圆盘四周看到盘中的恒星投影出去就是我们看到的银河。银河系的尺度和结构示意图见图1.4.5。银盘是恒星相对集中的区域，直径10万光年。中间的核球是椭球形，直径1.2万光年。核球中心处范围不大，物质特别集中，称为银核。银核的质量相当于几百万个太阳质量，有很剧烈的活动，是很强的射电源和高能辐射源（光盘图1.4.6　银盘和核球示意图）。银盘外面有一个范围广大的区域，稀疏地分布着一些由老年恒星组成的球状星团和星际物质，称为银晕。有人认为银晕也呈椭球形，长轴和短轴之比为2∶1。

银河系是旋涡星系，由 5 条旋臂组成，这 5 条旋臂的名称是：英仙臂、猎户臂、人马臂、南十字臂和矩尺臂。太阳位于猎户臂的内侧。在银晕外围还有一个更广大的区域，是银河系射电辐射区，大致呈球形，称为银冕。银晕的直径约 30 万光年，银冕的直径约 68 万光年。

20 世纪 60 年代以前，估计银河系的总质量是 1.8×10^{11} 倍太阳质量，恒星质量占 90%，弥漫星云和星际物质占 10%。现在知道存在大量暗物质，重新估计银河系总质量达到 2×10^{12} 倍太阳质量。多一个数量级，总量就多了 10 倍。看来，在银河系范围内，亮物质与暗物质之比为 1∶9。银河系也有自转，太阳系附近的银河系自转速度为 220 千米/秒，周期 2.7 亿年。

1.4.2 河外星系

银河系中除了大量的恒星以外，还有很多由尘埃或气体等弥漫物质组成的形状各异的天体，称为星云，星云的物质密度非常稀薄，尺度很大但质量并不大。在望远镜中各种星云有非常美丽的外形，取有动人的名称，如蟹状星云、玫瑰星云、礁湖星云等。另一些看似星云的天体，实际上远在银河系之外，是与银河系同样级别的天体集团，称为星系（galaxy）。如距离银河系 290 万光年的仙女座星系（M31），其外形、结构、自转和组成都与银河系类似，大小和质量均比银河系大一倍。在南天极附近，有两个肉眼直接可见的云雾状天体，称为大、小麦哲伦星云，是麦哲伦（F. Magalhaes）绕地球航行时在南美洲见到并记录下来传到欧洲的。大、小麦哲伦星云也都是远在银河系之外的星系。每个星系都和银河系一样包含着数十亿至数千亿颗恒星，直径从几千光年到几十万光年。外观多种多样，大部分有旋涡结构，银河系只是众多星系中很普通的一员。现代望远镜观测到的星系已有数百亿之多，分布在浩瀚的宇宙中。

1.4.3 星系以上的四级天体系统

星系也有成群的结构。在银河系周围有 40 多个星系，包括仙女座星系、大小麦哲伦星云在内，组成了高一级的天体系统，称为本星系群。本星系群的尺度约为 400 万光年。在本星系群外面还有其他的星系群或星系团。星系群（group of galaxies）和星系团（cluster of galaxies）是同级天体系统，只是成员数目大小不同。通常把成员数不超过 100 个的称为星系群，更多的称为星系团。在距本星系群 6 000 万光年处，有一个室女星系团，拥有 2 500 多个成员，尺度约 1 300 万光年。室女星系团与其他一些星系团和星系群，包括本星系群在内，约 50 多个成员，又组成了一个更高一级的天体系统——本超星系团。本超星系团的尺度约为 1 亿光年。本超星系团不是唯一的，在它的外面约 3 亿光年处，又发现了另外一个超星系团——后发超星系团。在已知的可观测宇宙中约有 3 000 个以上的

超星系团，组成一个更为庞大的天体系统，称为总星系。目前人类探测宇宙深空的能力已达 130 亿光年以上，还没有看到总星系的边界。总星系也许就是整个宇宙中最高一级的天体系统了。从星系计数来研究天体系统分层的情况，发现到超星系团这一层次，天体系统成团的趋势已经减弱，趋向于均匀分布和各向同性的特征。但这不是最后结论，更新的观测发现也许还会揭示出整体宇宙结构未知的秘密。

现代天文学已观测到的宇宙，从星系开始，共分为四级天体系统，它们如图 1.4.7 所示。星系—星系群或星系团—超星系团（cluster of hypergalaxies）——总星系（metagalaxy）。

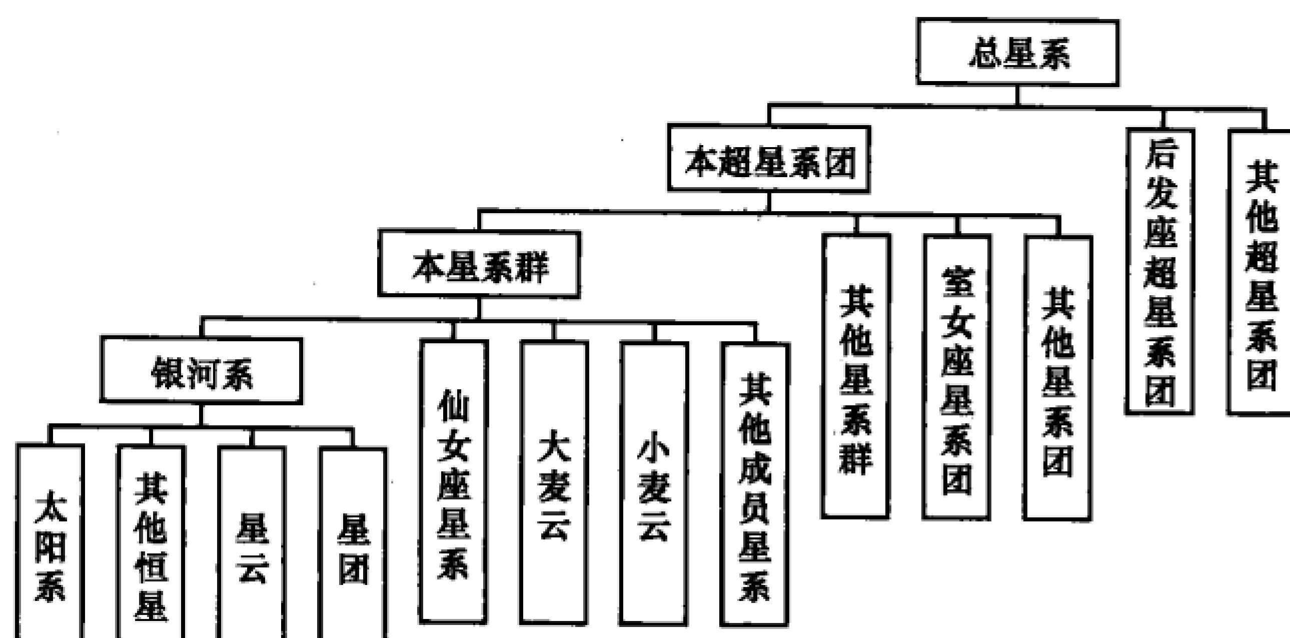


图 1.4.7　星系以上的四级天体系统

回到我们曾经比拟过的，按 1∶10^8 比例缩小的太阳系尺度，再缩至原来的万分之一，即按 1∶10^{12}（1 万亿分之一）的比例来比拟一下：太阳的直径只有 1.4 毫米，好像一粒绿豆；最近的比邻星是 40 千米外的另一粒绿豆；织女星距离 255 千米；红色超巨星参宿四直径 1.4 米，但远在 6 000 千米之外；体积最大的柱一，直径有 3.5 米。这些大大小小的恒星球体，总数有 3 000 亿个，组成一个扁平形状的银河系，直径竟达 90 万千米！小小的地球是在距离绿豆 15 厘米处的一粒微尘，直径只有 12 微米，同细菌差不多，不用显微镜是别想看到的。诗人苏东坡形容大小悬殊的物体是"寄蜉蝣于天地，渺沧海之一粟"（前赤壁赋），用之比拟地球在宇宙中的地位，还是远远不足的。

哥白尼的《天体运行论》1543 年在纽伦堡出版，标志着人类认识宇宙的第一次飞跃；但哥白尼的时代还不知道天王星及其以外的世界，他认为恒星是在属于上帝的不可知的天界上。时间流逝不到 500 年，人类的认识已经达到了总星系这个层次。如果再过 500 年、5 000 年、50 000 年，谁能预料人类的认识将会有怎样的进展。正如本章开头引用的雪莱的诗句："苍天，你还有秘密吗？人类已

揭开面纱，一切都显露无遗。”人类用科学的思维了解了宇宙的尺度和总体分层结构，我们不得不惊叹：宇宙是多么宏大，而人类是多么渺小。但我们掩卷遐思，就会觉得真正令人惊叹的是渺小的人类居然可以探测如此宏大的宇宙，追寻历史的踪迹，询问宇宙是如何产生，如何演化的，并且找到了、还将继续找寻着令人满意的答案。这才是真正的奇迹。



第 2 章　天球坐标系

宇宙是一本永远在我们面前打开着的大书，它是用数学语言写成的，其中有三角形、圆及其他几何图形。只有学会它的语言，我们才能读懂它，否则只能在黑暗的迷宫中瞎逛。

——伽利略

人类的任何研究活动，假如不能够用数学证明，便不能称之为真正的科学。

——达·芬奇

2.1　建立球面坐标的基本原则

2.1.1　天球

地球与其他天体之间的位置关系显然与地球自身的运动有关。地球的运动主要有两种：绕通过地球质心某一轴线的自转运动和地球质心绕太阳的公转运动。自转运动使得地面上的人看一切天体都向相反的方向旋转。公转运动由于公转轨道半径与恒星的距离相比微小得几乎可以略去不计，所以一般来说，公转运动对恒星的方向不发生影响。如果建立以地球质心为原点的空间坐标系统，或者把坐标原点移到地球表面的观察者那里，而坐标轴固定在地球上，则诸恒星的位置在这个坐标系统中不会因地球公转而发生变化，但因为地球自转，所有恒星会整体地绕一根轴线旋转，这根轴线就是地球自转轴在空间的无限延长线。以观察者为中心，以足够远的距离为半径作一个球面，观察者所看到的天体的位置就是天体投影在这个球面上的图像。人们可以借助几何知识，用球面上的坐标来表示天体的位置。至于天体到观察者之间的距离是感觉不到的，也不能用球面坐标来表达。天文学上称这样一个球面为天球。人们仰望天空时，直观感觉到与地平线相接的被称为“天穹”的半个球面就是天球的一部分（图 2.1.1）。

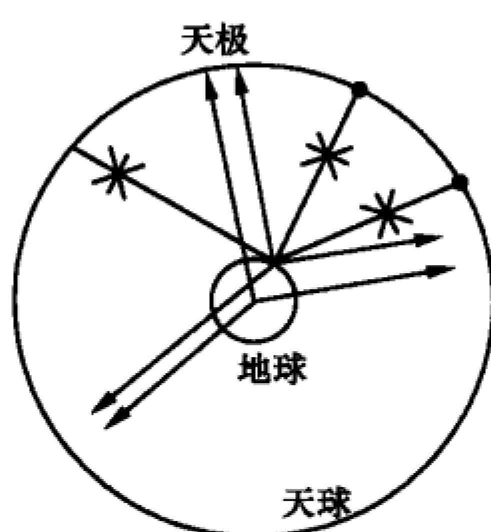


图 2.1.1　天球与地球

2.1.2　球面的几何性质

用任何一个平面切割球面，切痕都是圆。如果切割平面通过球心，圆的直径

最大，称为大圆；不通过球心时，圆的直径较小，称为小圆。球面上任意两点之间的联线以大圆弧为最短。大圆弧的长度是一个角度量，通过其对球心的张角来量度。通过球面上任意两点（与球心同在一条直线上的两点除外）可以作一个唯一的大圆。球面上任意两个不同的大圆必然相交于两点，两点的连线必然通过球心。球面上两个大圆弧之间的夹角用两个大圆平面的二面角来量度。通过球面上任意三点的三段大圆弧围成的一块球面称为球面三角形。球面三角形的三个边和三个角都是角度量。通过大圆中心（球心）作大圆平面的垂直线，与球面相交的两点称为该大圆的极。通过大圆的极的任意一个大圆都与原来的大圆垂直。从大圆上任意一点到极的大圆弧长度都是 90°（图 2.1.2）。两个大圆的交点是通过两个大圆的极的大圆的极。

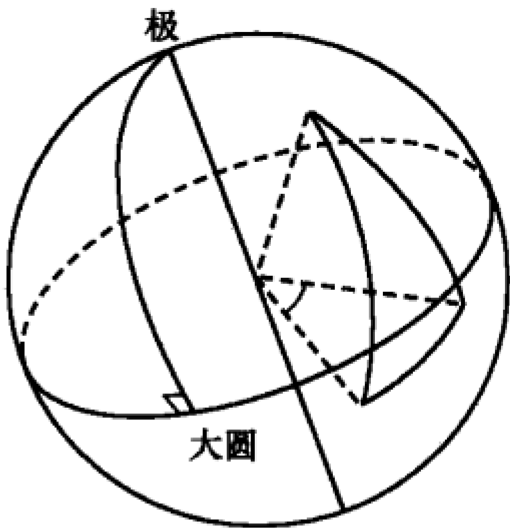


图 2.1.2 大圆、极与球面三角形

2.1.3 建立球面坐标的三个条件

同平面坐标一样，球面坐标用一对数字表示球面上点的位置。建立球面坐标需要先确定三个条件。

(1) 选择一条通过球心的直线作为基本轴，或选择一个特定的大圆作基本大圆。基本轴与基本大圆平面垂直，基本轴与球面的交点就是基本大圆的极。

(2) 选择球面上任意一点（极点除外）作基本点。

(3) 约定坐标量度的方向和范围。

以地球表面的球面坐标地理经纬度为例，基本轴是地球自转轴，基本轴与地球表面的两个交点是北极和南极；基本大圆是赤道；基本点是英国格林尼治天文台所在地 G（图 2.1.3）。地球表面任一地点 A 有两个坐标：地理经度和地理纬度。通过北极（或南极）和 A 点作大圆与赤道交于点 A'，通过北极和 G 点作大

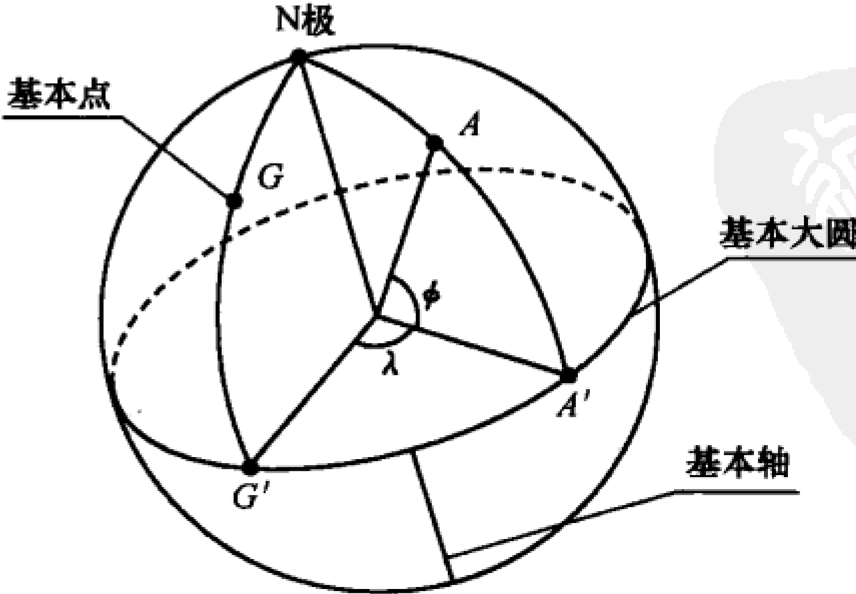


图 2.1.3 建立球面坐标

圆与赤道交于点 G'，弧长 AA'称为 A 点的地理纬度 ϕ，弧长 $G'A'$称为 A 点的地理经度 λ。纬度由赤道向两极度量，正负各 90°，约定向北为正，向南为负；经度由 G'向东西度量，正负各 180°，约定向西为正，向东为负。例如，天津市的纬度是 +39°08′（或写为北纬 39°08′），经度是 −117°03′（或写为东经 117°03′）。将地球看作正球体，地球表面上的经度圈都是大圆，沿经度线，纬度每差 1°的弧长都是相同的，约等于 111 千米（每差 1′相当于 1.85 千米，这就是航海里程中常用的长度单位“海里”）；纬度圈除赤道以外，都是小圆，沿纬度线，经度每差 1°的弧长随纬度不同而长短不一。

在天球上建立球面坐标，也遵从同样的原则，需具备以上三个条件。

2.2　三种常用的天球坐标系

2.2.1　地平坐标系

地平坐标系的基本轴是铅垂线，它与天球的交点 Z 称为天顶，Z'称为天底。基本大圆是与铅垂线垂直的地平圈 $E—S—W—N$（图 2.2.1）。当人站在地面上某一地点时，他的头顶正上方那一点就是天顶，他所见到的天与地相接的大圆就是地平圈。基本点是天北极 P（对于南半球的观察者是天南极），也就是地球自转轴延长以后与天球相交的一点。天北极近旁（实际相差 1°左右）刚好有一颗恒星——小熊座 α，称为北极星。通过天顶 Z 和天北极 P 作一大圆与地平圈相交于 N 和 S，称为北点和南点，这是定义地面上南北方向的基准点，与之垂直的为东点和西点，东南西北按顺时针方向排序。

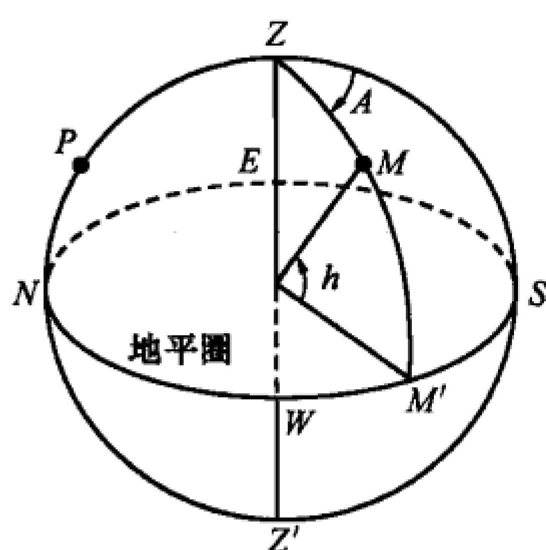


图 2.2.1　地平坐标系

地平坐标系的一对坐标是高度 h（也叫地平纬度）和方位角 A（也叫地平经度）。图 2.2.1 中 M 点是天球上的某个天体，通过天顶 Z 和 M 作大圆与地平圈相交于点 M'，弧长 MM'称为 M 点的高度，弧长 SM'或球面角 A 称为 M 点的方位角。约定高度从地平圈向天顶（或天底）度量，正负各 90°，向上为正，向下为负；方位角从南点（S 点）向东向西度量正负各 180°，向东为负，向西为正。

地平坐标系比较直观。只要你学会如何找到天上的北极星，并据此判断正南、正北方向，地平坐标系的基本大圆和基本点在天空中的位置是很容易确定的。但是，地平坐标系显然与观察者所在的地理位置有关，因为其基本轴是因地而异的，天体的地平坐标只对应于某个特定的地点。此外，还因为任何一个自然天体都在天球上有东升西落的运动（北极星除外），它们的地平坐标随时都在变化之中。

2.2.2 赤道坐标系

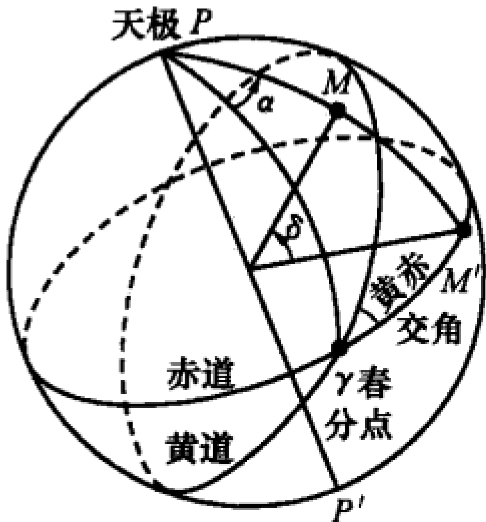


图 2.2.2 赤道坐标系

赤道坐标系的基本轴是地球自转轴，它的延长线与天球相交于天北极 P 与天南极 P' 两点。基本大圆是天赤道，也就是地球赤道平面延展以后与天球相交的大圆（图 2.2.2）。自然天体东升西落的运动总是沿着与天赤道平行的小圆进行的。地球绕太阳公转的轨道平面延展以后与天球相交的另一个大圆称为黄道，黄道与赤道的交角就是地球自转轴倾斜的角度，称为黄赤交角，约等于 $23°26'$。黄道与赤道有两个交点，每年春季太阳所在的那一点称为春分点，另一个称为秋分点。赤道坐标系的基本点是春分点，用白羊星座的符号 γ 表示。天体，如 M，在赤道坐标系中的一对坐标是赤纬 δ 和赤经 α（图 2.2.2)。通过天北极 P 和 M 作大圆与赤道相交于点 M'。弧长 MM' 称为 M 点的赤纬；弧长 $\gamma M'$ 称为 M 点的赤经。约定赤纬从赤道向天北极和天南极度量，正负各 90°；赤经从春分点起算，沿着与天体东升西落相反的方向度量，以时、分、秒的单位代替度、分、秒的单位，从 0^h 到 24^h。注意：这里的时、分、秒仍是角度量，也称时角、时分、时秒，只是名称和换算比例改变一下，换算值为 $1^h=15°$，$1^m=15'$，$1^s=15''$。

赤道坐标系没有地平坐标系那样直观，因为人很难凭感官判断天赤道在天上的位置，更无法确定春分点是天上哪一点。但赤道坐标与观察者所在的地面位置无关，对任何地点都是一样的。赤道坐标系的基本大圆和基本点都和天体一样参与东升西落的周日视运动，因而天体的赤道坐标不因东升西落而变化，是相对固定的。赤道坐标系与地平坐标系的优缺点刚好互补。天文学中更常使用的是赤道坐标系。

2.2.3 黄道坐标系

黄道坐标系与赤道坐标系类似，基本大圆是黄道，基本轴是与黄道面垂直的轴，它与天球交于两点：北黄极 Π 和南黄极 Π'，基本点也是春分点 γ（图 2.2.3)。北黄极 Π 的赤道坐标是：赤经 $\alpha=18^h$，赤纬 $\delta=90°-\varepsilon$（ε 是黄赤交角）黄道系的一对坐标是黄纬 β 和黄经 λ。图中 M 是天上某个天体，通过北黄极 Π 和 M 作大圆与黄道交于点 M'。弧长 MM' 称为 M 点的黄纬；弧长 $\gamma M'$ 称为 M 点的黄经。约定黄纬从黄道向北黄极和南黄极量度，正负各 90°；黄经从春分点起算，沿着与天体东升西落

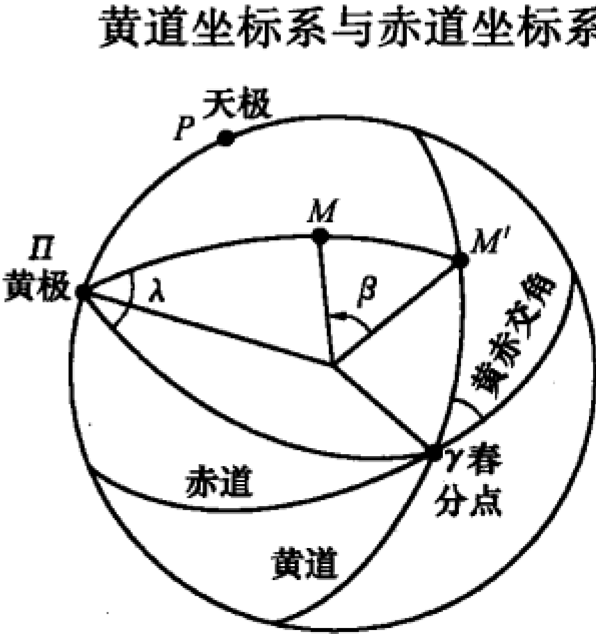


图 2.2.3 黄道坐标系

相反的方向度量，用度、分、秒单位，从 0°到 360°。黄道坐标系主要用于描述太阳系天体的运动。黄道坐标系的原点可以建在地心或日心上，分别称为地心黄道坐标系和日心黄道坐标系。

2.3　天体的周日视运动

2.3.1　不同纬度处天球的旋转

地球自转从北往下看是逆时针方向，从南往上看是顺时针方向（有北极星的一边为北）。人站在地球上，不觉得地球自转，只看到天球在反方向旋转，每 24 小时旋转一圈，称为天球的周日视运动。所有的天体都参与这一运动，沿着与赤道平行的小圆绕天极旋转，只有赤道上的天体才沿赤道做大圆运动。南北两极不参加周日视运动（图 2.3.1）。

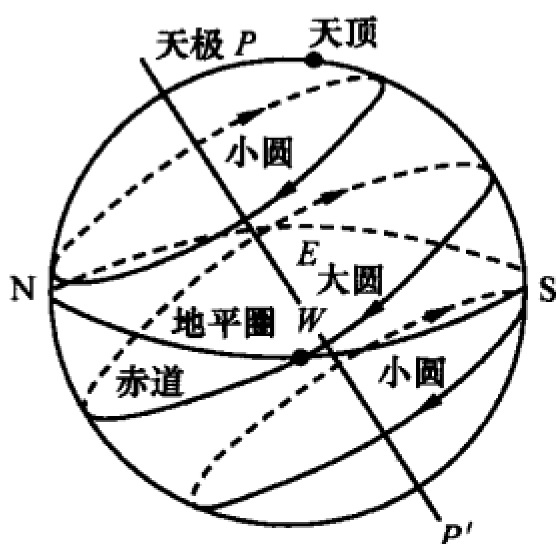


图 2.3.1　天球的周日视运动

北极星在北天极附近（距北天极约 1°），只作非常微小的周日视运动，肉眼不能觉察。北半球的居民看北极星总在天上一个固定的位置，它指示着正北方向。南半球的居民看南天极，也在天上一个固定的位置，但南天极附近没有肉眼可见的亮星，北极星又看不到，他们认起方向来就不如北半球方便了。

在北半球（南半球也类似）不同纬度的地方，北天极高度不同，赤道在天上的位置也不同。在北极，北极星在头顶上，$h=90°$，赤道就是地平圈，所有的天体都沿着水平的小圆运动，不升也不落（图 2.3.2 (a)）。夏天，太阳在地平线以上做水平运动，不会落山，没有黑夜，总是白天；冬天，太阳在地平线以下做水平运动，不出地面，没有白天，总是黑夜。在赤道，北极星降到地平线上（$h=0°$），赤道通过天顶；所有的天体，包括太阳，都直上直下地运动，在地平线以上的时间与在地平线以下的时间一样长，都是 12 小时，一年四季都昼夜平分（图 2.3.2 (b)）。在某一纬度 ϕ 的地方，北极星的高度等于当地纬度，$h=\phi$，赤道倾斜着，与地平圈的倾角等于 $90°-\phi$，所有天体也都倾斜着绕北极星运动。只有刚好在赤道上的天体（赤纬 $\delta=0°$）才是准确的东升西落（正东方升起，正西方落下），在地平线以上的时间与在地平线以下的时间各占一半，都是 12 小时。在赤道以北的天体（$\delta>0°$），从东偏北处升起，从西偏北处落下，在地平线以上的时间大于在地平线以下的时间；在赤道以南的天体（$\delta<0°$），从东偏南处升起，从西偏南处落下，在地平线以上的时间小于在地平线以下的时间。太阳夏

天在赤道以北，日出在东北方向，日落在西北方向，昼长夜短；冬天，太阳在赤道以南，日出在东南方向，日落在西南方向，昼短夜长（图 2.3.2 (c)）。

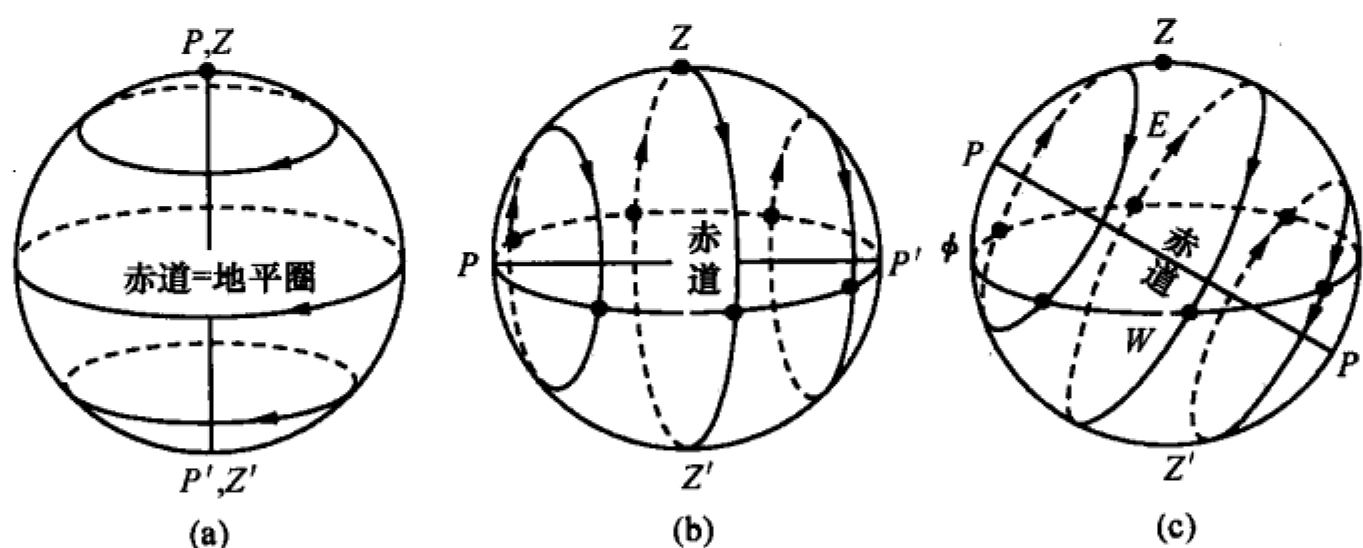


图 2.3.2 不同纬度处天体的升落

2.3.2 天体中天和永不升落的天体

天球上通过天极与天顶的大圆称为子午圈，刚好通过正南正北方向。天体周日视运动通过子午圈称为天体中天，离天顶近的一次（常在地平线之上）称为上中天，离天顶远的一次（有时在地平线以下）称为下中天，见图 2.3.3。天体升起时高度为 0，然后高度不断增加，上中天时达到最大值，上中天后高度逐渐降低，落入地平时又降为 0。下中天是天体高度取最小值的时候。上中天时，天体的高度 h、赤纬 δ 和地方纬度 ϕ 之间满足关系

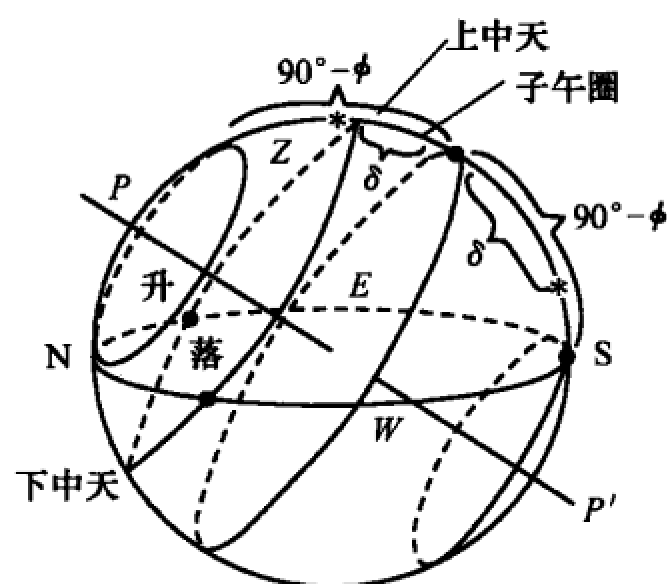


图 2.3.3 永不升、落的天体

$$h = 90° - |\delta - \phi|$$

下中天时，满足关系

$$h = -90° + |\delta + \phi|$$

满足条件 $\delta > 90° - \phi$ 的天体，下中天时的高度仍然大于 0，即在一天当中高度最低的时候仍然在地平线以上，不落入地下，称为永不落天体；满足条件 $\delta < -(90° - \phi)$ 的天体，上中天时的高度仍小于 0，即在一天当中高度最高的时候仍然在地平线下，不升出地平，称为永不升天体。对于南半球的观测者而言，ϕ 为负值，天体永不落的条件为 $\delta < -(90° + \phi)$；永不升的条件为 $\delta > 90° + \phi$。天体永不升落的条件既和天体的赤纬有关，也和当地纬度有关。在两极，所有的天体都永不升或永不落；在赤道，所有天体都有升有落；在中纬地区，有些天体永不

升，有些天体永不落。在与中国北京同纬度的地区，全天 21 颗最亮恒星中，有 6 颗永不升起，永不落的 1 颗也没有（参见本书附录 1）。

2.3.3　天体的赤道坐标与地平坐标的换算

看图 2.3.4，过天体 M 和天极 P 作的大圆与子午圈的夹角称为时角 t，从子午圈沿天体周日视运动的方向度量，从 0°到 360°。天体的 t 值随天体的周日视运动不断变化。

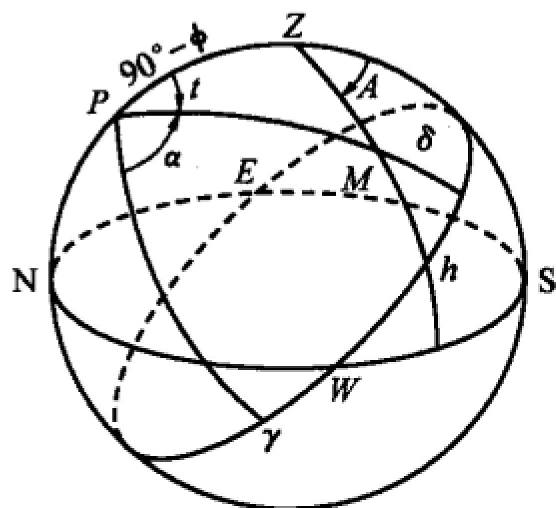


图 2.3.4　地平与赤道坐标的换算

由 P、Z、M 组成的球面三角形称为天文三角形。其中 $PZ=90°-\phi$，$PM=90°-\delta$，$ZM=90°-h=z$，z 称为天顶距。ϕ 是地方纬度，δ 是天体的赤纬，h 是天体的高度。$\angle PZM=180°-A$，$\angle ZPM=t$，A 是天体的方位角。

根据球面三角公式解天文三角形，可得（推导从略）

$$\sin h=\sin\phi\sin\delta+\cos\phi\cos\delta\cos t \tag{2.3.1}$$

$$\sin A=\frac{\cos\delta\sin t}{\cos h} \tag{2.3.2}$$

$$\cos A=\frac{\sin\phi\sin h-\sin\delta}{\cos\phi\cos h} \tag{2.3.3}$$

已知 ϕ、δ 和 t，由（2.3.1）式可以计算高度 h，由（2.3.2）式和（2.3.3）式可以分别计算天体的方位角 A。根据象限关系，同时满足（2.3.2）式和（2.3.3）式的 A 只有唯一解。

例如，已知英仙座 α 星的赤纬 $\delta=49°.8$，时角 $t=324°$，计算在纬度 $\phi=39°.1$ 的地方看这颗星的高度 h 和方位角 A。

从（2.3.1）式计算

$$\sin h=\sin 39°.1\sin 49°.8+\cos 39°.1\cos 49°.8\cos 324°=0.886\,9$$

得

$$h=62°.5$$

再从（2.3.2）式计算

$$\sin A=\frac{\cos 49°.8\sin 324°}{\cos 62°.5}=-0.821\,6$$

得

$$A=-55°.2\text{ 或 }-124°.8$$

从（2.3.3）式计算

$$\cos A=\frac{\sin 39°.1\sin 62°.5-\sin 49°.8}{\cos 39°.1\cos 62°.5}=-0.570\,4$$

得

$$A=124°.8\quad\text{或}\quad-124°.8$$

唯一解是 $A=-124°.8$（即北偏东 55°.2）。

相反的计算，如果已知天体的高度 h、方位角 A 和地方纬度 ϕ，计算它的赤纬 δ 和时角 t。利用另一组公式

$$\sin\delta=\sin\phi\sin h-\cos\phi\cos h\cos A \tag{2.3.4}$$

$$\sin t=\frac{\sin A\cos h}{\cos\delta} \tag{2.3.5}$$

$$\cos t=\frac{\sin h-\sin\phi\sin\delta}{\cos\phi\cos\delta} \tag{2.3.6}$$

由（2.3.4）式计算 δ，由（2.3.5）式和（2.3.6）式分别计算 t。同样根据象限关系，确定同时满足（2.3.5）式和（2.3.6）式的唯一解。

同上例，在纬度 $\phi=39°.1$ 的地方，已知英仙座 α 星的高度 $h=62°.5$，方位角 $A=-124°.8$，计算它的赤纬 δ 和时角 t。从（2.3.4）式计算

$$\sin\delta=\sin39°.1\sin62°.5-\cos39°.1\cos62°.5\cos(-124°.8)=0.763\,9$$

得

$$\delta=49°.8$$

再从（2.3.5）式计算

$$\sin t=\sin(-124°.8)\cos62°.5/\cos49°.8=-0.587\,4$$

得

$$t=324° \quad 或 \quad 216°$$

从（2.3.6）式计算

$$\cos t=\frac{\sin62°.5-\sin39°.1\sin49°.8}{\cos39°.1\cos49°.8}=0.809\,1$$

得

$$t=36° \quad 或 \quad 324°$$

唯一解是 $t=324°$。

t 的值与天体的赤经、地方经度和标准时间有关，具体的计算在 3.3 节中加以介绍。

2.3.4 天体的赤道坐标与黄道坐标的换算

已知天体的赤经 α 和赤纬 δ，计算天体的黄经 λ 和黄纬 β 的公式为

$$\sin\beta=\cos\varepsilon\sin\delta-\sin\varepsilon\cos\delta\sin\alpha$$

$$\cos\lambda=\frac{\cos\delta\cos\alpha}{\cos\beta}$$

$$\sin\lambda=\frac{\sin\delta\sin\varepsilon+\cos\delta\cos\varepsilon\sin\alpha}{\cos\beta}$$

式中 ε 是黄赤交角 $=23°26'21''$。

已知天体的黄经 λ 和黄纬 β，计算天体的赤经 α 和赤纬 δ 的公式为

$$\sin\delta=\cos\varepsilon\sin\beta+\sin\varepsilon\cos\beta\sin\lambda$$

$$\cos\alpha=\frac{\cos\beta\cos\lambda}{\cos\delta}$$

$$\sin\alpha=\frac{-\sin\beta\sin\varepsilon+\cos\beta\cos\varepsilon\sin\lambda}{\cos\delta}$$

太阳总在黄道上，黄纬 β 总为 0，计算太阳黄经可用以下 3 个简化公式

$$\sin\lambda=\frac{\sin\delta}{\sin\varepsilon}$$

$$\cos\lambda=\cos\delta\cos\alpha$$

$$\sin\lambda=\frac{\sin\alpha\cos\delta}{\cos\varepsilon}$$

所有黄道上的天体，赤纬 δ 必须在 $\pm\varepsilon$ 之间，而且赤纬 δ 与赤经 α 的值必须满足

$$\tan\delta = \sin\alpha \mathrm{tg}\varepsilon$$

对于像太阳、月亮等近距天体，还要考虎是圆面中心还是边缘，坐标原点是在地心、日心还是地面上；精确的计算还要考虑坐标系本身的变化（见 2.5 节）等复杂的因素。

2.4 太阳的周年视运动

2.4.1 太阳周年视运动是地球公转的反映

地球绕太阳公转的轨道是一个椭圆，太阳在椭圆的焦点上，公转周期是一年。公转的方向，从北边看是逆时针方向，从南边看是顺时针方向，与地球自转的方向一致。地球一面公转，一面也在自转，自转轴的空间指向在公转过程中保持不变。地球赤道面在公转过程中虽然时时在空间中改变着位置，但始终保持平行，赤道面与轨道面的倾角保持不变（严格说两者都有微小变化，见 2.5 节）。

对于地球上的观察者，天球上的赤道与黄道分别是地球赤道面与地球公转轨道面延展与天球相交的大圆，两个大圆的交角等于赤道面与轨道面的倾角，称为黄赤交角 ε，ε 的精确值为 23°26′21″.448。黄道与赤道的两个交点称为春分点和秋分点。

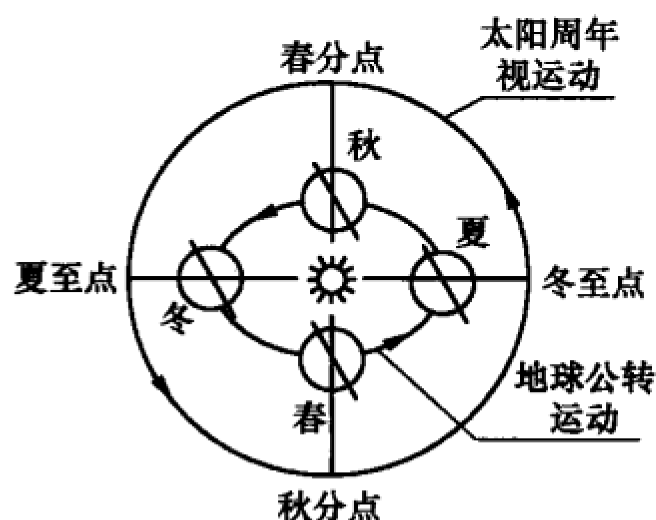


图 2.4.1 太阳的周年视运动

人在地球上不觉得地球绕太阳运动，只看见太阳在星空背景上沿黄道运动（假设白天也能看见太阳后面的星空背景），周期与公转周期相同。这种运动称为太阳周年视运动，简称太阳视运动或太阳周年运动。太阳周年视运动的方向如何呢？请看图 2.4.1。图中椭圆是地球公转的真实轨道，春、夏、秋、冬四点，表示每年春分、夏至、秋分、冬至四个时刻（称为分至时刻）地球在轨道上的位置，地球上的人看太阳的投影方向分别对应于星空背景上（天球上）的春分、夏至、秋分、冬至四个点。显然，太阳周年视运动的方向与地球公转运动的真实方向是一致的，与地球自转的方向也是一致的。但是，请注意：在天球上看到的天体周日视运动的方向与地球自转方向刚好相反，也就是说，在天球上看到的太阳周年视运动的方向与周日视运动的方向刚好相反。太阳参与周日视运动，是东升西落，自东向西；同时太阳相对于星空背景有周年视运动，是自西向东。联系到 1.1.5 小节中说过的，月亮参与周日视运动的同时，相对于星空背景的运动也是

自西向东。但月亮跑得快，一个月就跑一圈；太阳跑得慢，一年才跑一圈。记住这一点非常重要。

正是因为有太阳周年视运动，才有四季星空的变化。请看图 2.4.2 的四幅分图：狮子、天琴、飞马、猎户是春夏秋冬四季星空中著名的星座，太阳沿着箭头所示的方向做周年视运动，中央的圆代表地球，对着太阳的一面是白天，背着太阳的一面是黑夜。地球上站着一个半夜看星的人。春季里，太阳在飞马座附近，半夜时，人们当空看到的是狮子座；夏季时，太阳移到猎户座，半夜当空的是天琴座；秋季里，太阳在狮子座中，飞马座成为半夜星空的主角；到冬季，太阳移向天琴座，人们半夜见到的是猎户座。这几幅图画出了一年当中星空的变化。下

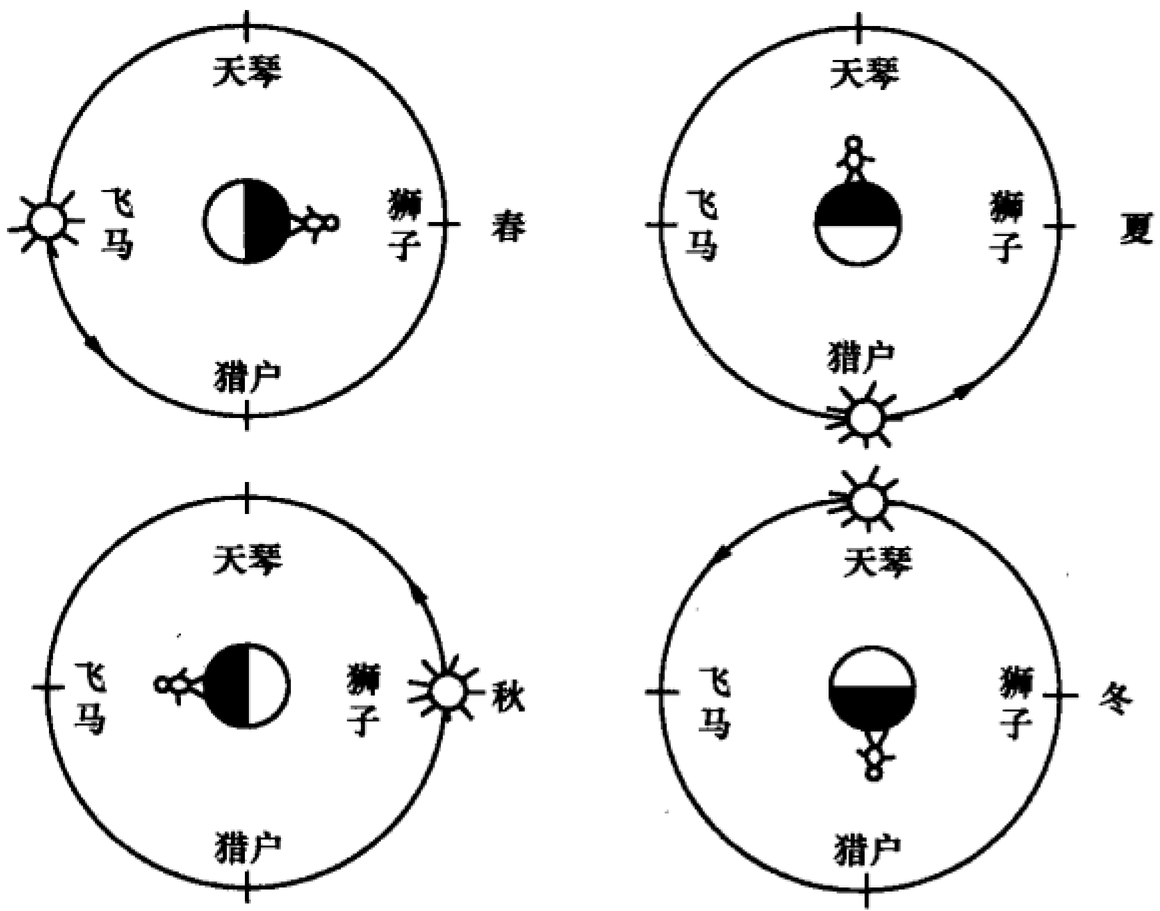


图 2.4.2 四季星空的变化

面再来看看一夜之间星空的变化。以图 2.4.2 中的夏季星空为例，请看图 2.4.3：天琴座当空是半夜时见到的景象，这时飞马座在东边正待升起，狮子座已在西天即将没入地平线。由于星空周日视运动（注意箭头方向与太阳周年视运动的方向相反），6 小时以后，天快亮了，太阳连同猎户座一起移到了东方地平线下，天琴座已经西坠，马上就要落山，升上当空的是飞马座；而半夜之前 6 小时，太阳与猎户座在西边地平线上，天刚黄昏，天琴座正从东方升起，

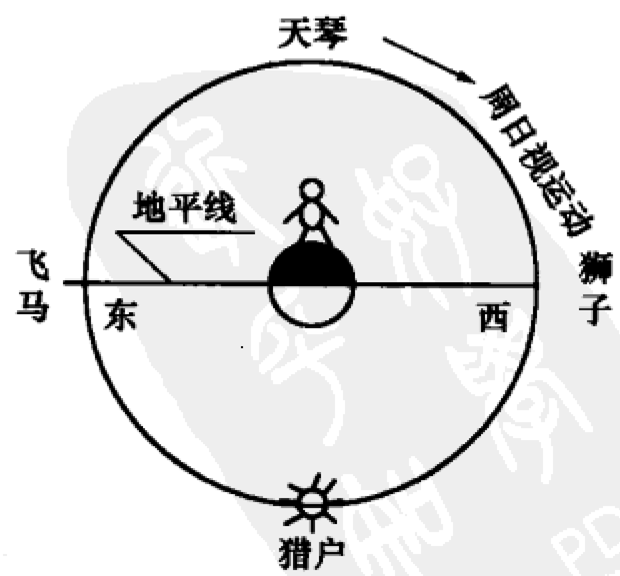


图 2.4.3 星空的昼夜变化

高踞天空的是狮子座。

2.4.2　太阳周年视运动中黄经的变化

根据约定，天体的黄经从春分点起算，沿黄道与周日视运动的相反方向，也就是太阳周年视运动的方向度量。太阳的地心黄经随太阳周年视运动作周年变化。每年春分时刻，太阳在春分点，黄经为 0°；夏至时刻，太阳在夏至点，黄经为 90°；秋分时刻，太阳在秋分点，黄经为 180°；冬至时刻，太阳在冬至点，黄经为 270°；次年春分，太阳又回到原处，一年一个周期，称作回归年。春分、夏至、秋分、冬至是中国农历中的 4 个节气。节气一共有 24 个。廿四节气是中国古代文明的独特创造，它们是一年当中的 24 个时刻，对应于太阳周年视运动的 24 个等分位置（注意是角度等分，不是时间等分），每隔 15°一个，其名称和顺序见图 2.4.4。节气名称取意于我国黄河流域的农业生产活动和气候及物候。有一个好记的方法是：4 个分至点的中间节气是四立：立春、立夏、立秋、立冬，合起来共 8 个，然后在这 8 个节气中，每两两之间再安排 2 个节气，一共是 24 个节气。由于地球公转轨道是椭圆，轨道运动速度不是均匀的，所以以太阳黄经值等分的廿四节气，其时间间隔并不均匀。但从任一节气到下一年同一节气的时间间隔都是相同的，都等于回归年。回归年的精确值是 365.242 192 64 日。节气的农历日期不是固定的。公历是太阳历，所以节气的公历日期相对固定，但有时也会有 1～3 天的偏差。这是由于公历的历法安排不准确造成的。节气比公历日期更符合自然周期，用于指导农事更为准确。节气是一个时刻，对全球各地的居民都是同一物理时刻，但各地时差不同，所以节气的各地地方时并不相同，甚至不在同一天。例如 2002 年立夏是 5 月 6 日北京时间凌晨 1 时，而在法国巴黎却是 5 月 5 日下午 6 时，不在同一日期。对世界各地，节气不在同一日期的事是经常发生的，幸好外国人一般不懂得什么是节气。由于我国政府规定全国统一使用北京时间，所以中国境内所有节气都应该在同一日期。



图 2.4.4　廿四节气

2.4.3　不同纬度处太阳视运动的轨迹

太阳因周年视运动，其赤纬在 ±23°.5 范围内变化：夏至时，太阳赤纬最大，等于 +23°.5；冬至时最小，为 −23°.5；春、秋分时，太阳在赤道上，赤纬

等于 0°。

不同纬度处太阳视运动表现不同。在两极，所有天体，包括太阳都做水平运动，不升不落。夏至时（南极为冬至）太阳在最高处沿高度为 23°.5 的小圆做水平运动。随着季节变化，此高度圈缓缓下落，秋分时在地平线上，冬至时落到地平线下最低点，然后再缓缓上升，次年春分才回升至地平线，渐渐露出地平，夏至时到达最高位置。一年当中太阳半年不升起，半年不下落，一天当中太阳总是沿水平线运动，一昼夜等于一年。

在赤道，太阳总是直上直下地运动。夏至时，在东偏北 23°.5 处升起，西偏北 23°.5 处落下；冬至时在东偏南 23°.5 升起，西偏南 23°.5 处落下。春分和秋分日正午，太阳到达天顶，是一年中正午太阳最高的日子，日出正东，日没正西。一年四季昼夜平分。

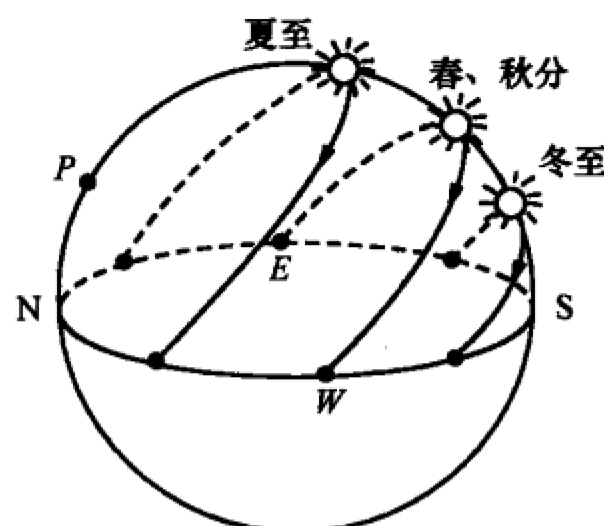


图 2.4.5 太阳的升落

在北半球中纬地区（北回归线以北），太阳升落的情况可见图 2.4.5。设太阳赤纬为 $\delta_\odot$，中午时太阳高度为

$$h = 90° - \phi + \delta_\odot$$

式中，ϕ 是当地纬度。一年当中，太阳正午高度，随 $\delta_\odot$ 不同而变化。夏至时，$\delta_\odot = 23°.5$，正午太阳最高，高度 $h = 90° - \phi + 23°.5$，日出东北，日没西北，昼最长，夜最短；冬至时，$\delta_\odot = -23°.5$，正午太阳最低，$h = 90° - \phi - 23°.5$，日出东南，日没西南，昼最短，夜最长。一年当中，只有春分秋分两天，正午太阳高度 $h = 90° - \phi$，日出正东，日没正西，昼夜平分。其余日期，日出、日没的方向总有偏离，昼夜长短总不一致。越靠北方（南半球越靠南方）方向偏离和昼夜长短的变化越显着。

在北回归线以南、赤道以北的地方，如中国的广州、深圳、海南及港澳各地，夏至前后 $\delta_\odot$ 将大于 ϕ，用上式算出的正午太阳高度将超过 90°，这可以理解为太阳已到达天顶以北，确切的高度值应为 $180° - h$。在这些地方，同在赤道地区一样，一年之中正午太阳最高的日子不在夏至日，而在夏至前后正午太阳高度刚好等于 90°的某两个日子里。

全球其他地方的太阳升落情况，可以从以上介绍类推。

2.4.4 日地距离与四季冷暖变化的原因

战国时代的文献《列子 · 汤问》中记载着一个故事：两位少年辩论太阳早晨近还是中午近。一个说太阳早晨大，中午小，应是早晨近；另一个说早晨冷中午热，太阳应是中午近。争持不下，问恰巧路过的孔子，孔子也答不上来。现在我

们知道，早晨和中午，太阳到地球的距离是一样的。太阳早晨大中午小是人眼的错觉，其实根本没有变化。早晨凉中午热有两方面的原因：早晨阳光斜照，中午阳光直射，单位面积上得到的光能量差异很大；另一个原因是地球积蓄的热量夜间散失较多，白天又重新积蓄了。

太阳到地球的距离在一年当中确实是变化的，冬天（对南半球是夏天）近一些，夏天远一些。因为地球在每年 1 月 4 日前后过椭圆轨道上的近日点，这时日地距离最近；半年以后地球过远日点，日地距离最远。两者相差约 500 万千米。季节冷暖并不是距离差别造成的，而是阳光斜照和直射使然。请看图 2.4.6，冬至时阳光直射南回归线，直射区单位面积上得到的太阳能量最多，南半球过夏季，北半球过冬季；再看图 2.4.7，夏至时阳光直射北回归线，北半球过夏季，南半球过冬季。一年当中最冷和最热的时候并不在冬至和夏至，而在大约一个月之后的大寒和大暑节气（即民间的数九和数伏）。这是因为地球体和地球大气层有一个积蓄热量的滞后过程。

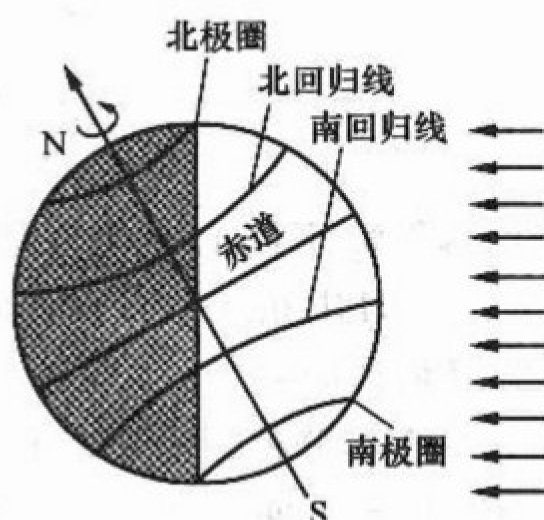


图 2.4.6　冬季日照

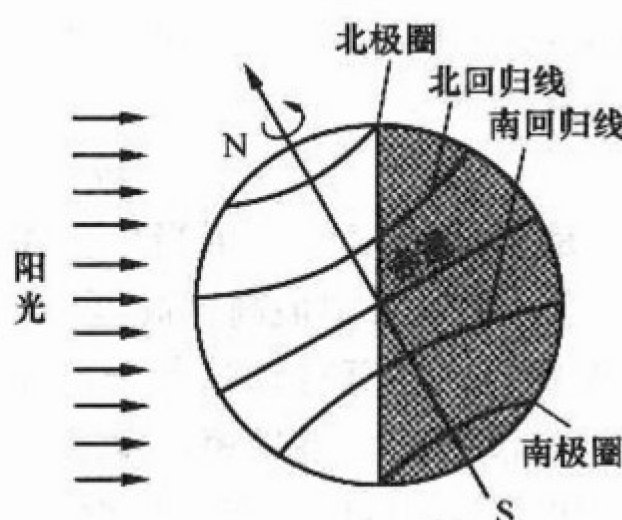


图 2.4.7　夏季日照

日地距离的变化可以这样来计算：已知地球公转轨道的半长径 $a\approx1.5\times10^8$ 千米，轨道偏心率 $e=0.017$。设 b 为轨道半短径，f 为焦点到椭圆中心的距离。地球在近日点时到太阳的距离等于 $a-f$，远日点时到太阳的距离为 $a+f$，两者之差 $\Delta d=2f$。由 $a^2=b^2+f^2$，$e=f/a$，不难推导出 $\Delta d=2ae\approx510$ 万千米。目前，地球近日点的日心黄经 $\lambda_j=102^\circ.8$，每年在冬至与小寒之间，1 月 4 日前后，地球过近日点（图 2.4.8），这时太阳的地心黄经为 $180^\circ+\lambda_j=282^\circ.8$。由于其他行星（主要是木星）的摄动影响，地球近日点向东缓慢偏转，约 10.8 万年转一圈。

地球公转遵从开普勒面积定律（图 2.4.9），即单位时间内地球向径扫过的面积相等。在近日点附近地球运动得快一些，远日点附近运动得慢一些，才能维持面积定律。节气是依角度划分的，因此冬季的节气之间，时间间隔要短于夏季。从立夏到立秋，地球向径扫过 90°，时间间隔是 93 天 14 小时；从立冬到立春，地球向径也扫过 90°，时间间隔却是 89 天 1 小时。

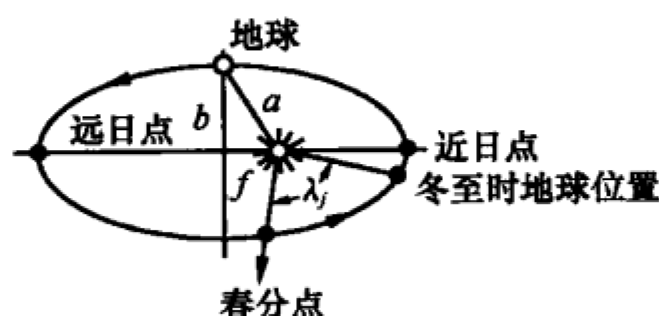


图 2.4.8 日地距离的变化

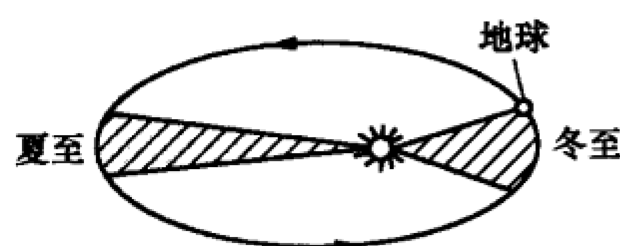


图 2.4.9 轨道运动的面积定律

2.5 天球赤道坐标系本身的运动

2.5.1 岁差与地球自转轴进动

2.4.1 小节说过，地球自转轴的空间指向在公转过程中保持不变，这在较短时间内，比如说一年或几十年内，对精度要求不高的情况而言是对的。对很长时间而言，地球自转轴的空间指向有缓慢的变化。

地球自转轴是倾斜的，地球又不是正球体，根据刚体转动的力学原理，在月球或太阳引力的作用下，自转轴有被“扶正”的趋势。但转动着的地球产生一种抗力，使地球自转轴不但不会被扶正，还要保持倾角不变，绕与黄道面垂直的轴缓缓旋转，扫过一个圆锥面，旋转一周是 26 000 年。这一运动称为地球自转轴进动。自转轴进动的现象可见于一种儿童玩具“陀螺”。陀螺不动时，一定倒着；一旦转起来，即使倾斜也不会倒下，但转动轴不断改变着方向。

地轴进动时，与黄道面的倾角不变，但赤道平面与黄道平面的交线要在黄道面上缓缓转动，造成春分点不断西移，每 26 000 年移动一圈，每年移动约 50″，使得以节气为准的回归年短于真正的地球公转周期恒星年，约短 20 分钟，这一现象称为岁差。“岁差”一词出自《宋史·律历志》：“虞喜云：尧时冬至日短星昴，今二千七百余年，乃东壁中，则知每岁渐差之所至。”虞喜（281～356 年）是晋朝天文学家，他根据当时的天文观测与历代记录进行比较，发现冬至日黄昏出现于正南方的星宿明显地发生了变化。唐尧时代，冬至日黄昏过中天的星是昴宿（金牛座），到了他这个时代，变成了壁宿（飞马座）。他认识到这是冬至点不断西移的结果，并明确指出“天自为天，岁自为岁”。意即以“天”（恒星）为准的“年”和以冬至节气为准的“岁”是有差别的，这就是岁差。公元前 2 世纪，古希腊天文学家依巴谷（Hipparchus）虽然早于虞喜发现岁差，但数据远不如虞喜精确。岁差与地轴进动是同一物理机制引起的，有时也把两者及同一机制引起的其他现象统称为岁差。

在图 2.5.1 中，地球自转轴与黄道平面的垂直方向偏离 ε 角（黄赤交角）。地球不是正球体，赤道区隆起的两部分（实际是一个环状连续体）到月球或太阳的距离不同，所受到的引力 f_1 和 f_2 大小不同，$f_1>f_2$。f_1 的作用是“扶正”地球自转轴，f_2 的作用是“拉倒”地球

自转轴，两力合成的作用是要“扶正”。如果地球不自转，地轴就被扶正了，但地球自转产生的抗力使自转轴保持倾角不变，并绕黄道平面的垂直轴沿一个锥度为 2ε 的圆锥面运动，周期约 26 000 年，这就是地轴进动。地轴进动时，赤道面与黄道面的交线也以同一周期在黄道面上旋转（见图 2.5.2），使天球上的春分点 γ 在黄道面上向 γ' 位置位移。这个位移方向与太阳周年视运动的方向相反，是自东向西移动，称为春分点西移。地轴沿圆锥面进动一圈的同时，春分点也西移了一圈，又回到原来位置。由图 2.5.3 可见，当太阳每年春分时离开春分点 γ 做周年运动，一年之后返回的时候，春分点已从原来某一恒星位置 γ 向西移到了另一恒星位置 γ'。太阳回到新的春分点完成了一个回归年周期，所花的时间比回到原来的恒星位置要短一些，而回到原来恒星位置所花的时间才是真正的地球公转的物理周期，称为恒星年。这就是回归年短于恒星年的道理。回归年与恒星年的差值即为岁差。按时间量计算，每约 26 000 年差一年，每年差约 20 分钟；按角度量计算，每约 26 000 年差 360°，每年差约 50″。用天体测量方法直接测定的是角度量，称为日月岁差 p_1（由太阳和月亮导致赤道面的变化而引起）。除 p_1 之外，春分点位置还因黄道面的微小移动（见 2.5.4 小节）而沿赤道向东位移，位移量 λ 称为行星赤经岁差，其值由天体力学理论给出，每年约 0″.13。p_1 和 λ 的综合影响构成春分点向西移动的实际量，称为黄经总岁差 p，$p=p_1-\lambda\cos\varepsilon$，是国际天文常数系统（见附录 2）的基础常数之一，现代值为 $p=50''.290\,966$（对于 2000.0 历元）。由 p 及回归年长度，换算恒星年长度，再反推地轴进动的周期，公式为

$$\frac{\text{恒星年}}{\text{回归年}}=\frac{360^\circ}{360^\circ-p}$$

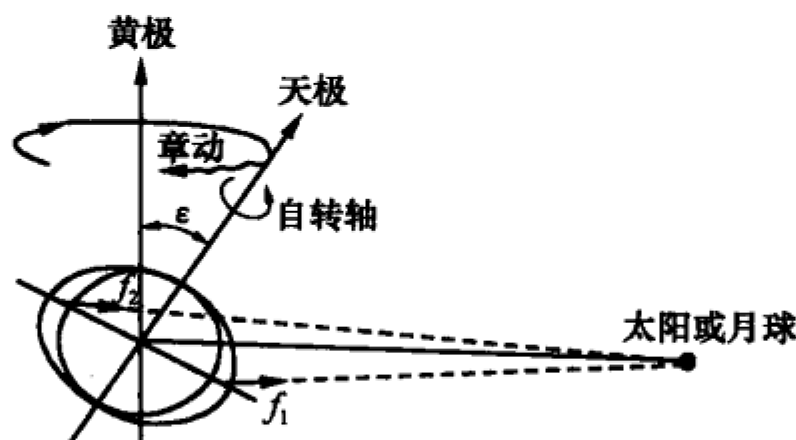


图 2.5.1　地球自转轴进动

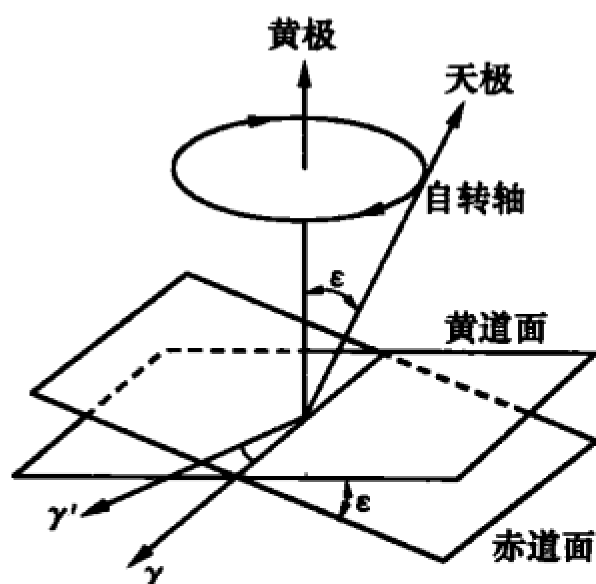


图 2.5.2　春分点西移

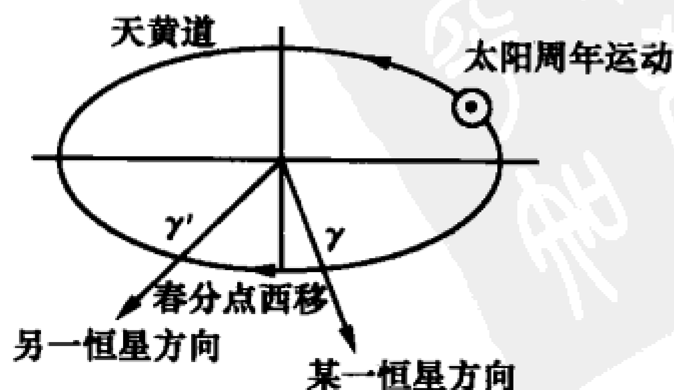


图 2.5.3　回归年缩短

可算出恒星年=1.000 038 806 回归年。回归年长度至今仍采用 1896 年巴黎“国际基本恒星会议”上决定的，由美国天文学家纽康（S. Newcomb）提供的值

$$31\,556\,925.974\,7\text{ 秒} = 365.242\,198\,781\text{ 日}$$

不过这是 1900 年历元的值，将其换算到 2000.0 年历元，回归年长度为365.242 192 64 日，据此计算 2000.0 历元的恒星年长度为 365.256 366 24 日，回归年与恒星年的差值为 $20^{m}24^{s}.599\,0$。这个差值积累满一个恒星年所需的时间就是地轴进动的周期：

$$365.256\,366\,24\text{ 日} / 20^{m}24^{s}.599\,0 = 25\,770(\text{年})$$

这一数字也等于 $360°/p$。由于黄道的变化，恒星年长度也是变化的。

2.5.2 岁差产生的后果

下面介绍的岁差产生的后果，都是同一物理机制引起的现象。

1. *天极绕黄极运动*

地轴进动使天极不能固定在某一个恒星位置，而在天球上沿一个小圆绕黄极做缓慢移动，小圆的半径是黄赤交角 23°.5，约 26 000 年移动一周。现在北天极在小熊座 α 位置，它就是现在的北极星。公元前 3 000 年，北极星是天龙座 α；公元 14 000 年，北天第二亮星织女星将成为北极星（图 2.5.4）。

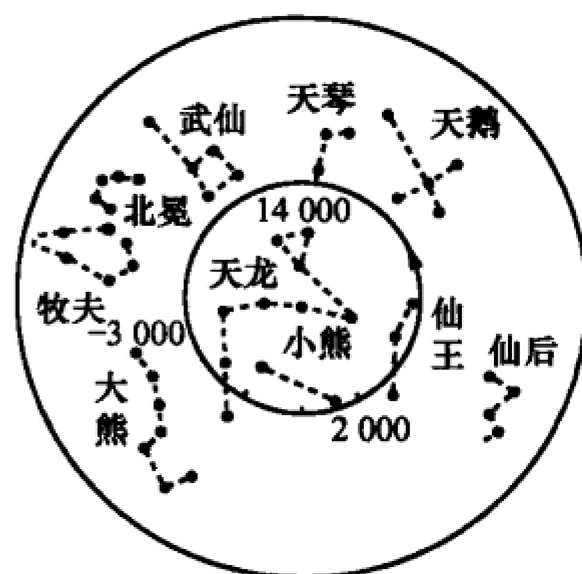


图 2.5.4 北天极的移动

2. *恒星的赤经、赤纬和黄经有微小变化*

这种变化不是恒星自身的运动，而是由于赤道坐标系的基本大圆赤道和基本点春分点的岁差运动造成的。星图或星表中的恒星位置数据都要标记相应的年代就是这个原因。所标记的年代称为历元，一般每 50 年更换一次。例如，织女星的位置数据记为 $\alpha_{2\,000.0} = 18^{h}36^{m}.9$，$\delta_{2\,000.0} = +38°47'$，其中 2 000.0 就是历元。严格说来，任何天体的赤经、赤纬和黄经值每天每时都在变化，任一时刻的精确值通过专门的公式加以计算。

除上述两点以外，前面介绍过的春分点西移和回归年缩短都是同一机制引起的，有时统称为岁差引起的后果。当代春分点的位置已从古希腊时代的白羊星座移到了现在的双鱼星座靠近宝瓶星座的地方，这也是岁差引起的后果。

2.5.3 章动

地球自转轴沿光滑圆锥面进动，是只单独考虑月球或太阳的作用。实际情况要复杂得多。对地球自转轴施加外力的不仅有月球和太阳，还有各大行星。日、月、行星的轨道各有各的平面，行星到地球的距离也变化多端，联合作用力的大

小和方向是复杂多变的。加之地球本身不是刚体，内部质量分布既不均匀也不恒定，大气环流、海洋潮汐等多种因素，使地球自转轴的空间运动非常复杂。天文学中把自转轴沿着一个光滑圆锥面的等速运动部分归为岁差，而把所有其他复杂的摆动统归为章动（图 2.5.1）。现代天体测量采用的章动共有 106 项，其中最主要的一项（称为章动主项）与黄道、白道（月球绕地球公转的轨道称为白道）的交点变化周期 18.6 年有关，中国古代称这一周期为一章，故名章动。章动主项的振幅被列为天文常数系统中的导出常数，其值根据沃尔（J. Wahr）和木下宙（H. Kinoshita）章动理论定为 9″.202 5（J2000.0）。

2.5.4　黄赤交角的变化与地球极移

前面只讨论了地球自转轴进动的问题，也就是赤道面的问题，没有涉及黄道面的变化。月球和行星的引力干预使黄道面的空间位置也有微小变化，这种变化使黄赤交角改变数值。在章动中，地球自转轴的摆动虽然也导致黄赤交角的改变，但那是短周期的，有别于黄道面变化引起的长期变化。黄道面的长期变化使当前黄极正向天极靠近，黄赤交角每世纪减小约 46″.8，减小的趋势还会持续 15 000 年左右，然后将转为增大。黄赤交角的数值也是国际天文常数系统中的基础常数，现代值为 $\varepsilon=23°26'21''.448$（J2000.0）。黄道面变化当然也造成春分点沿赤道的移动，方向是东移而不是西移，称为行星岁差，数值比赤道面变化造成的日月岁差小，由天体力学理论计算得到的值为 0″.13。

地轴进动造成的天极在星空背景中的移动，与地轴在地球体内的位置移动是不同的概念，两者在力学机制上有一定的联系，但各有不同的规律。后者造成的直接效应就是极移，即地球南北两极在地球表面上的移动。极移自 1888 年被天文学家发现以来，受到天文、地球物理和大地测量学界的普遍关注。自那时起，组织国际联合方法加以监测，并成立了“国际纬度服务”（ILS）的专门机构，通过一些指定的国际纬度站不断进行纬度测量来监测极移（其中中国的天津国际纬度站也做了很好的工作），后改为“国际极移服务”（IPMS），再后又改为“国际地球自转服务”（IERS），向全世界提供地极移动的实测数据。监测方法已从天文光学观测，发展到采用卫星、激光测距、长基线射电干涉等技术，监测精度达到 1 米的量级，成为天文学领域内时间最长的国际合作项目。监测结果表明，一个世纪以来，地球北极在直径不超过 20 米的地面范围内扑朔迷离地转了 80 多圈，包含着多种周期因素，走出了一条蜿蜒曲折的路线（图 2.5.5）。图中 CIO 为

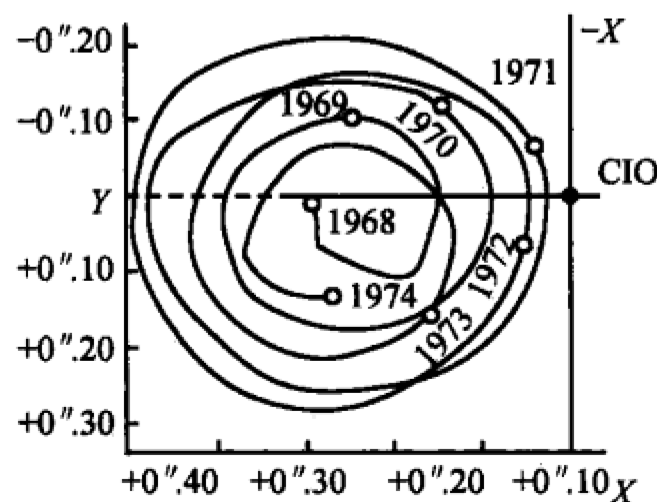


图 2.5.5　地球极移轨迹

参考原点，称为“国际协议原点”，X 轴在经度 0°方向，Y 轴在西经 90°方向。在更加漫长的岁月中，地极会不会偏出很大的范围或长期向一个方向移动？因为这是涉及地球上寒温各带的转换，导致生态和环境根本改变的重大问题，当然受到各界的普遍关注，但目前研究的结果对此还没有明确的答案。

2.6 太阳系行星和卫星上的天球坐标系

2.6.1 月球上的星空

月面上的天空中，看不见蓝天白云，但永远有灿烂的群星和清澈的银河。月面上的天空背景，不论白天黑夜，永远是漆黑的。太阳、地球、星星和银河都可以同时在漆黑的天幕上各自发光。恒星的光不再闪烁；天体发出的所有波段的电磁波辐射，都毫无阻碍地倾泻在月面上；流星体也许会冷不丁地坠落你的面前，事先没有声音或光亮的痕迹。

在月面天球上，有与月球自转轴垂直的月赤道、绕地球公转轨道的投影白道、和地月系绕太阳公转轨道的投影黄道这三个大圆。相对于恒星际空间，黄道是固定不动的，赤道与黄道相交 1°32′，白道与黄道相交 5°09′。白道对赤道有 6°41′的倾斜而且倾角不变，只有交点沿黄道运动，周期 18.6 年（图 2.6.1 (a)）。与此同时，白极与月极（月面天极）分列在不动的黄极两旁，位于同一条大圆弧上。在 18.6 年的周期内，月极围绕黄极做圆周运动，半径 1°32′；白极也绕黄极做圆周运动，半径 5°09′（图 2.6.1 (b)）。由于天极离黄极很近，通常可以忽略它们的差别，在月面天球上，赤道与黄道也就可以看成是同一个大圆了。

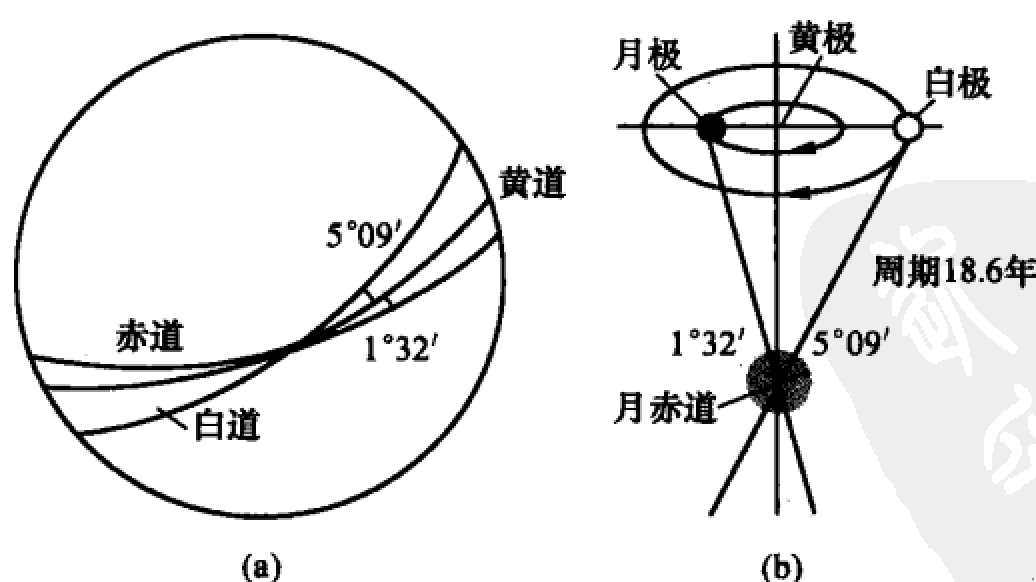


图 2.6.1 月面天球上的赤道、白道和黄道

在月球上看恒星，所有星座的排列和形状，都和在地球上看到的一样，但更加明亮和壮观。由于月球的自转轴没有倾斜，就没有四季星空的变化。白天与黑

夜一样星光灿烂，星空整体的绕天极旋转，东升西落，每月旋转一圈。星星们“月月”重复着同样的运行路径，不分白天黑夜，没有阴晴晨昏，常常与日、地同辉。由于月球的重力只及地球的 1/6，在地球上显得笨重的天文仪器，到了月球上便轻巧灵便起来；由于天体在天空中的运行速度，只及地球上的 1/27，长时间观察同一天体便成为轻而易举之事。到月球上去观察星空，成为天文爱好者的理想之举，当然更是天文学研究的必由之路。

在月球上看太阳，太阳也和恒星一样，每“月”东升西落。由于月球随地球绕太阳公转，太阳升落的周期比恒星升落的周期长 2 天 5 小时 0.8 分。太阳除升落之外，还在星座之间穿行，与在地球上看到的一样，沿黄道每年运行一圈。不分一年四季，永远昼夜平分。半个月是白天，半个月是夜晚。在太阳下落的那半个月漫漫长夜，月面漆黑寒冷，天上只有星光和蓝色的地球（如果在月球背面，地球便永不可见），更显寂寞和凄凉。

在月球上看地球，蔚蓝色的地球，是月面星空中最大、最美丽的天体，比地球上见到的月亮直径大 4 倍，也有圆缺变化，但却总固守天空一隅、任凭太阳和群星与之相对运动。光盘图 2.6.2 是阿波罗 11 号宇航员在飞临月球时拍摄的照片：半轮“明地”在“月平线”上空（光盘图 2.6.2　半轮“明地”在“月平线”上空）。

因为月球的自转周期与绕地球的公转周期相同，轨道面又与赤道面接近重合，在月面天球上，地球基本上是固定不动的，没有升起和下落，就像地球赤道上空的定点人造通信卫星那样。但由于月赤道与白道有 6°41′的倾斜，天上的地球便会在赤道两侧做周期性的摆动（纬天平动）；还由于月球的公转轨道是椭圆，运动角速度是不均匀的，与均匀的自转角速度相比，天上的地球就会在白道上有超前、落后的摆动（经天平动），幅度±6°16′。所以月面上空的地球，不是纹丝不动。她在一个很小的天区范围（大致相当于北斗七星斗勺之内）步履极慢地徘徊，每月一个往复。地球不动，太阳和恒星在动，它们之间当然就有相对运动：既有周月运动，也有周年运动和以 18.6 年为周期的交点进动。

站在月面上不同的“月点”，天空也有不同的景色。月面经纬度类似地球那样划分。纬度的起点是月赤道，经度的起点是月赤道上的平均对地点。月赤道由东向西穿过危海、静海、中央湾、风暴洋（光盘图 2.6.3　月面诸海和中央湾、风暴洋）。平均对地点在中央湾里。为了确定平均对地点的位置，通常使用一个直径 13 千米的特别明亮的小环形山“默斯汀 A”，它的坐标是：5°09′50″W，3°10′47″S。从 0°到东经 90°是地球人上弦时见到的半个月亮；从 0°到西经 90°是地球人下弦时见到的半个月亮。±90°～180°是地球人见不到的月球背面。月、地质心的连线穿过月球表面的两点叫做对地点和背地点。对地点也是地球上可见的那半个月面的中心点。对地点不是月面上固定的点，有周期性的漂移：经度范

围约 380 千米，纬度范围约 405 千米。

在月球两极地区，天极位于头顶上。恒星沿平行圈周月运动。太阳在月平线上既有周月运动，同时也在恒星间周年运动。太阳和恒星都永不升落。太阳能量微弱，温度极低。一切物体的影子都拉得很长很长。环形山中央的盆地永远处在黑暗的山影中。地球永远在月平线上月面经度的起点上。略微有一点升降和左右移动。

在月球赤道地区，天极落在月平线上。恒星和太阳都直上直下运动，东升西落，半个月在天上，另半个月在底下。地球永远悬挂在东或西边的固定位置，略微有一点升降和左右移动。东经 0°～90°，地球在正西方向；西经 0°～90°，地球在正东方向。经度±90°～180°，进入月球背面，永远见不到地球。

在月球中纬度地区，天极高度等于月点纬度。恒星和太阳都沿着倾斜的平行圈东升西落，周月运动。有些恒星永不升，有些恒星永不落。太阳沿赤道在恒星中穿行，周年运动。不分一年四季，永远昼夜平分。半个月是白天，半个月是夜晚。在月球背面各点，永远看不到地球。在月球正面各点，地球永远悬挂在天上固定的位置，略微有一点升降和左右移动。东经 0°～90°，地球在西部天空；西经 0°～90°，地球在东部天空。具体位置与所在月点经纬度有关，可通过球面三角公式计算

$$\sin h = \cos\phi \cos\lambda$$

$$\sin A = \frac{\sin\lambda}{\cos h}$$

$$\cos A = \tan\phi \tan h$$

式中，λ、ϕ 是月面经纬度，h、A 是月面天球上的高度和方位角，其定义与地面天球相同。

地球上看月亮，有圆有缺。月球上看“地亮”，同样也有缺有圆。“地相”和月相的盈亏周期、成因和表现都是一样的，但其“相”却刚好相反：当月相正圆的时候，“地相”正亏；地球上正值无月之夜的当儿，一轮圆圆的“明地”却照澈月面上空。蛾眉月与圆过又缺的“地相”凑成一对，而一弯“残地”与将圆未圆的前凸月同时显现在月面和地面的天空中。“地相”和月相刚好互补，凑在一起刚好是一个完整的圆面。当然，“地亮”比月亮面积大得多，两者也不可能真的拼合在一起。

当地球上发生日食的时候，月球上便发生“地食”。蓝色地球上出现了月球的黑影，但不可能发生地球全被挡住的“地全食”。当地球上发生月食的时候，月球上便发生“日食”，太阳可能会很长时间地处在地球黑影之中，全食时间超过 3 小时。在月球上还经常可以看到地球上看不到的天象“地掩星”和“日掩星”，即硕大的地球或明亮的太阳挡住了它们后面的恒星或行星，过程比地球上看到的“月掩星”要长得多。

2.6.2　行星上的恒星和太阳视运动

在地球上，天球坐标系的建立是为了方便、准确地描述日月星辰等天体在天

球上的位置和运动，同时也定义地面各点的方向和位置。地球自转和地球绕太阳公转是建立天球坐标系的事实依据。无论地平坐标系、赤道坐标系还是黄道坐标系都离不开天极这个基本要素。因为地球早期人类文明主要分布在北半球，他们所能见到的那个天极便定义为天北极，另一个为天南极。天北极近旁恰巧有一颗较亮的恒星——小熊座 α，便被命名为北极星。人站在地球上，面向天北极，正前方定义为北方，然后按顺时针顺序定义东、南、西方向。南半球的居民看不到天北极，但能看到天南极，虽然没有相应的“南极星”。面向天南极，他的正前方就是南方，同样按顺时针顺序定义西、北、东方向。有一个可行的方法：找到南十字星座，延长十字架的竖道与至 4 倍远处，就是南天极位置（光盘图 2.6.4 南十字星座）。

东、南、西、北方向按顺时针定义是全球各地统一的规则，只有南北两个极点除外。人站在北极点，四面八方都是南，西、北、东没有意义；人站在南极点，四面八方都是北，东、南、西没有意义。两个面对面站立的人，如果两人之间的脚下是北极点，按上述规则会相互觉得对方在北，自己在南；自己右手是东、左手是西，方向相互矛盾。所以在极点附近区域，只能用经纬度指示点位。

在地球上观察天体，人们常说“东升西落”，那是地球自转的反映。更确切的说法是天体按“拇指指向天北极的”左手螺旋规则运动，因为地球自转的方向是“拇指指向天北极的”右手螺旋规则（图 2.6.5）。无论南北半球，规则是统一的，都是“东升西落”。只是要注意，在南半球的天空中，天北极在地底下（图 2.6.6）。

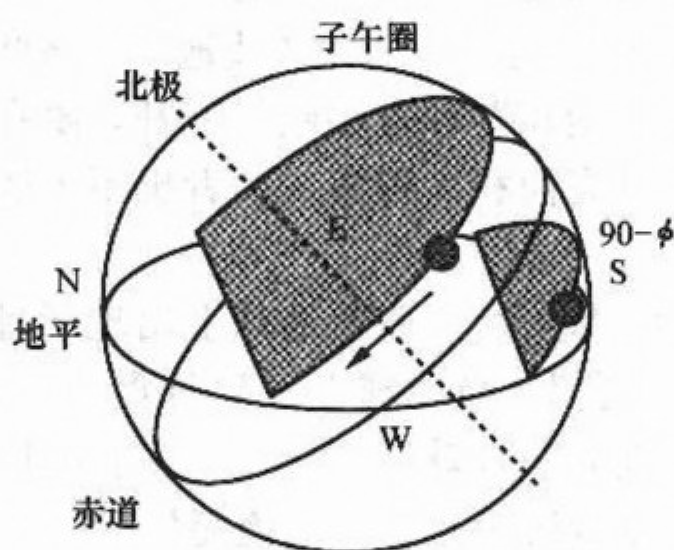


图 2.6.5　北半球所见的天体运动

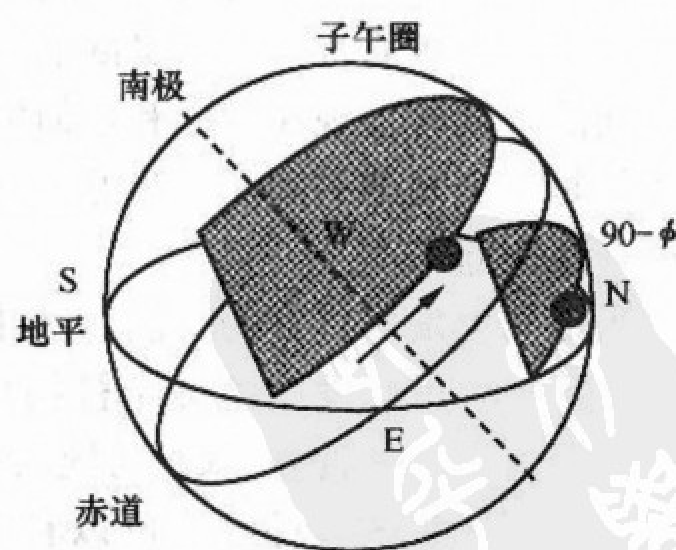


图 2.6.6　南半球所见的天体运动

在太阳系其他行星上，要根据行星自转的情况定义天球坐标系和天北极的位置。但是，有两条规则必须共同遵守：①定义在黄道平面以北的那个极点为天北极（虽然黄道平面只是地球绕太阳公转的轨道平面，但其余行星的轨道平面

都与黄道平面接近，不影响定义的成立；②定义东、南、西、北方向按顺时针排序。

地球自转轴有约 23°.5 的倾角。自转轴倾角的定义是："自转角速度矢量的正向与公转角速度矢量的正向之间的夹角"。所谓正向，是指右手螺旋系统中，拇指所指的方向。8 大行星的有关数据列于表 2.6.1。请注意，表中各行星的自转轴倾角都小于 90°，而金星和天王星自转角速度（自转周期）取负值，即所谓"逆向自转"。在金星和天王星的天空中，天体"西升东落"。如果自转角速度（自转周期）一律取正值，则金星和天王星的自转轴倾角大于 90°，分别是 177°.36 和 97°.77，仍为"逆向自转，西升东落"。

表 2.6.1　8 大行星的公转和自转数据

8 大行星	转道面对黄道面的倾角/(°)	公转周期	自转轴倾角/(°)	自转周期/日	天北极位置	
					赤径/(°)	赤纬/(°)
水星	7.005 0	87.9674 日	0.01	+58.646 2	281.03	+61.46
金星	3.394 6	224.6960 日	2.64	−243.018 5	272.76	+67.16
地球	—	365.2564 日	23.45	+0.997 3	—	+90
火星	1.849 9	686.9649 日	25.19	+1.026 0	317.73	+52.91
木星	1.304 7	11.862615 年	3.13	+0.413 5	268.06	+64.49
土星	2.485 3	29.447498 年	26.73	+0.444 0	40.90	+83.57
天王星	0.772 8	84.016846 年	82.23	−0.718 3	257.41	−15.18
海王星	1.767 7	164.79132 年	28.33	+0.671 2	299.44	+42.97

表 2.6.1 的数据取自 2007 年美国天文年历；而本书附录 6 取自 Wikipedia 开放百科全书 2008 年的数据。除个别尾数有所差异外，注意附录 6 的金星和天王星自转轴倾角取 177°.3 和 97°.86，但是原表中将他们的自转周期也取负值，这就不对了，本书引用时已作更正。

在所有行星的星空中，因行星自转而产生的天体周日运动，都按左手螺旋规则围绕各自的天北极运行。金星和天王星拇指向南（西升东落），其余行星拇指向北（东升西落）。东南西北一律按顺时针排序。

恒星的周日运动仅与行星自转有关而与行星绕日公转无关，所以恒星的周日运动周期就是行星的自转周期。而太阳的周日运动不仅与行星自转有关，也与行星绕日公转有关。以地球上的星空为例：太阳因地球自转而产生的周日运动自东向西，周期 0.997 3 天；因地球公转而产生的周年运动自西向东，周期 365.242 2 天，两种运动方向相反（图 2.6.7（a）），周年运动对周日运动起到"刹车"的作用。叠加的结果，太阳周日运动的周期是 1 天（24 小时），也就是地球上的昼夜周期，比自转周期加长了。昼夜周期与自转周期的差别也就是"平太阳日"与

“恒星日”的差别，每天约为3分56秒（见3.3）。昼夜周期可通过“会合方程式”计算

$$T=\frac{T_z\times T_g}{T_g-T_z}$$

式中，T是昼夜周期，或会合周期，T_z是自转周期，T_g是公转周期。从式中可以看出，当$T_g\gg T_z$时，昼夜周期就等于自转周期。用上式计算各行星的昼夜周期T，结果列于表2.6.2。

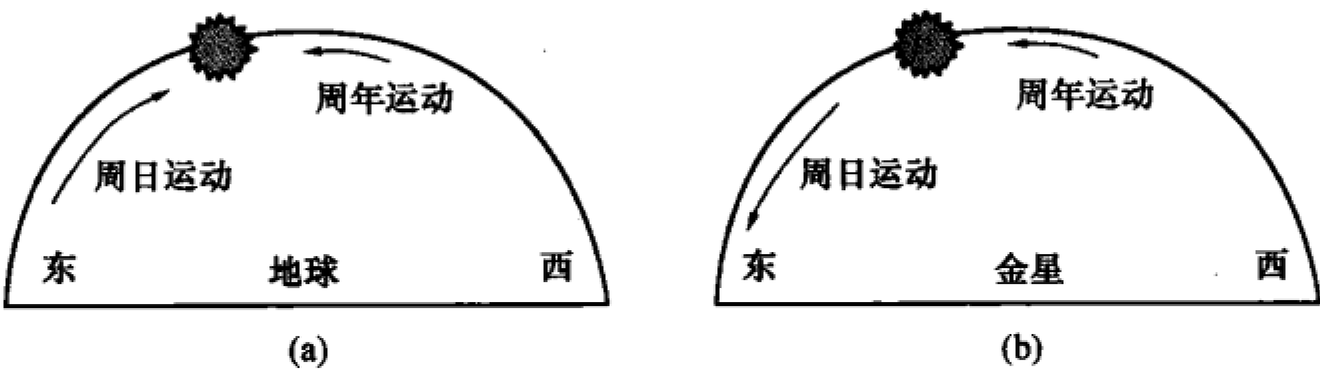


图2.6.7 太阳的周日和周年运动方向

表2.6.2 各行星的昼夜周期

行星	T_z/日	T_g/日	T/日	行星	T_z/日	T_g/年	T/日
水星	58.646	87.968	175.94	木星	0.414	4330.6	0.414
金星	−243.018	224.965	−116.82	土星	0.444	29.423	0.444
地球	0.997	365.25	1.00	天王星	−0.718	83.747	−0.718
火星	1.026	686.93	1.028	海王星	0.671	163.723	0.671

数据表明，木星以远的行星昼夜周期与自转周期相同，不受公转的影响，而金星和天王星的昼夜周期为负值，即太阳“西升东落”。有趣的是，在金星上，两天即超过一年；而在水星上，两年才等于一天。金星上的太阳周年运动与周日运动方向相同（图2.6.7（b）），对周日运动起到“加速”的作用。叠加的结果，昼夜周期比自转周期缩短了。

2.6.3 行星上的四季和昼夜长短

在地球上，由于自转轴有约23°.5的倾斜，才造成了一年四季温度不同和昼夜长短的变化。地理纬度越高，昼夜长短的变化越强烈。在纬度大于66°.5的极圈以内，会出现永昼、永夜现象。

在任一行星上纬度为ϕ处（设为北半球，南半球类似），当太阳赤纬$>90°-\phi$时，出现永昼；太阳赤纬$<-(90°-\phi)$时，出现永夜。一年之中太阳赤纬取值于$\pm\epsilon$之间。（ϵ为行星自转轴的倾角）。因此，只有纬度$>90°-\epsilon$的地区（极圈以内），才会出现永昼、永夜现象。各行星的$90°-\epsilon$值列于（表2.6.3）。八大行星的情况分三种类型，列于表2.6.4和图2.6.8中。

表 2.6.3 各行星的 90°−ε 值

参 数	水 星	金 星	地 球	火 星	木 星	土 星	天王星	海王星
ε	0.01	2.64	23.45	25.19	3.13	26.73	82.23	28.33
90°−ε	89.99	87.36	66.55	64.81	86.87	63.27	7.77	61.67

表 2.6.4 四季和昼夜长短变化的不同类型

行 星	太阳赤纬变化	极圈范围	常年有昼夜的区域	四季和昼夜长短变化
水、金、木	很小	几乎没有	几乎全球	基本没有
地、火、土、海	较大	较小	很大	明显
天王	极大	几乎全球	几乎没有	极端突出

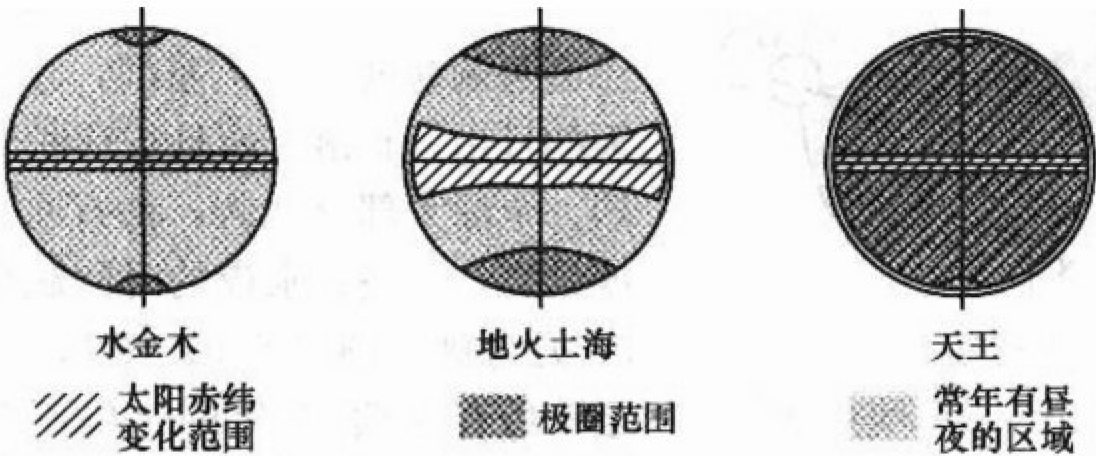


图 2.6.8 三种不同情况的行星

计算行星在一个公转周期 T_g 中太阳永不落（升）的时间长短可以考虑为：在行星表面纬度为 ϕ 处，当 $\delta_\odot=90°-\phi$ 时，有

$$\lambda_\odot = \arcsin\left[\frac{\sin(90°-\phi)}{\sin\varepsilon}\right]$$

当太阳黄经在 $\lambda_\odot$ 与 $180°-\lambda_\odot$ 之间时，太阳永不落。这一段时间长度为（设行星公转轨道近似为正圆）

$$\begin{aligned}\Delta T &= \frac{T_g\times(180°-2\lambda_\odot)}{360°}\\ &= T_g\times\left\{180°-2\arcsin\left[\frac{\sin(90°-\phi)}{\sin\varepsilon}\right]\right\}\Big/360°\end{aligned}$$

对地球、金星和天王星计算结果列于表 2.6.5。

表 2.6.5 地球、金星和天王星的永昼永夜时间

地 球		金 星		天王星	
纬度/(°)	永昼/天	纬度/(°)	永昼/天	纬度/(°)	永昼/年
90	183	90	112	90	42
85	157	89	85	70	32.6
70	62	88	53	50	23.1

续表

地　球		金　星		天王星	
纬度/(°)	永昼/天	纬度/(°)	永昼/天	纬度/(°)	永昼/年
68	40	87.8	44	30	13.6
67	22	87.6	34	10	2.89
66.6	6	87.5	27	8	0.69
66.5	0	87.3	0	7.7	0

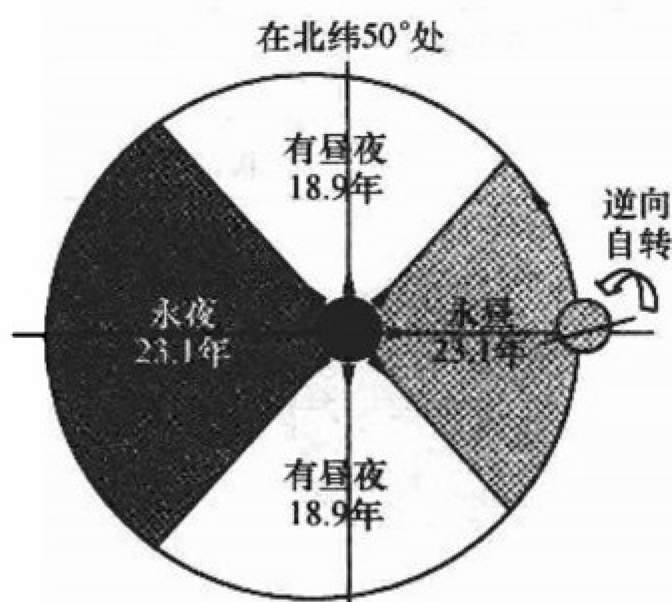


图 2.6.9　在天王星北纬 50°处一年四季的昼夜分布

最为特殊的要算躺着转的天王星。它的公转周期 83.747 4 年，自转轴倾斜 82°.23，逆向自转，太阳西升东落。虽然昼夜周期仅为－0.718 3 日，约－17.2 小时，但只有在赤道两侧纬度±7°.7 范围，才可全年见到每天的日出、日落，而且昼夜长短变化非常强烈。全球大部分地区，都有永昼、永夜，纬度越高，永昼、永夜的时间越漫长。以北纬 50°处为例（图 2.6.9；图 2.6.10）：每年夏至前后有连续 23 年的永昼，太阳在天上绕着天北极（蛇夫座 η，一颗与小熊座 α 相当的二等星）打转转，每 17.2 小时转一圈，就是不下山。好容易有下山了，还有好几年的“白夜”时光，天就是不黑。然后才有约 10 多年有昼有夜的日子。只在秋分前后有短短几天昼夜平分，以后白天日渐缩短，直至进入 23 年之久的漫漫长夜。熬到春季来临，经过一段有短暂蒙蒙曙光的日子，太阳终于露脸了。白天一天天加长，昼夜平分的“春分”过后，10 多年有昼有夜的日子过半，最终

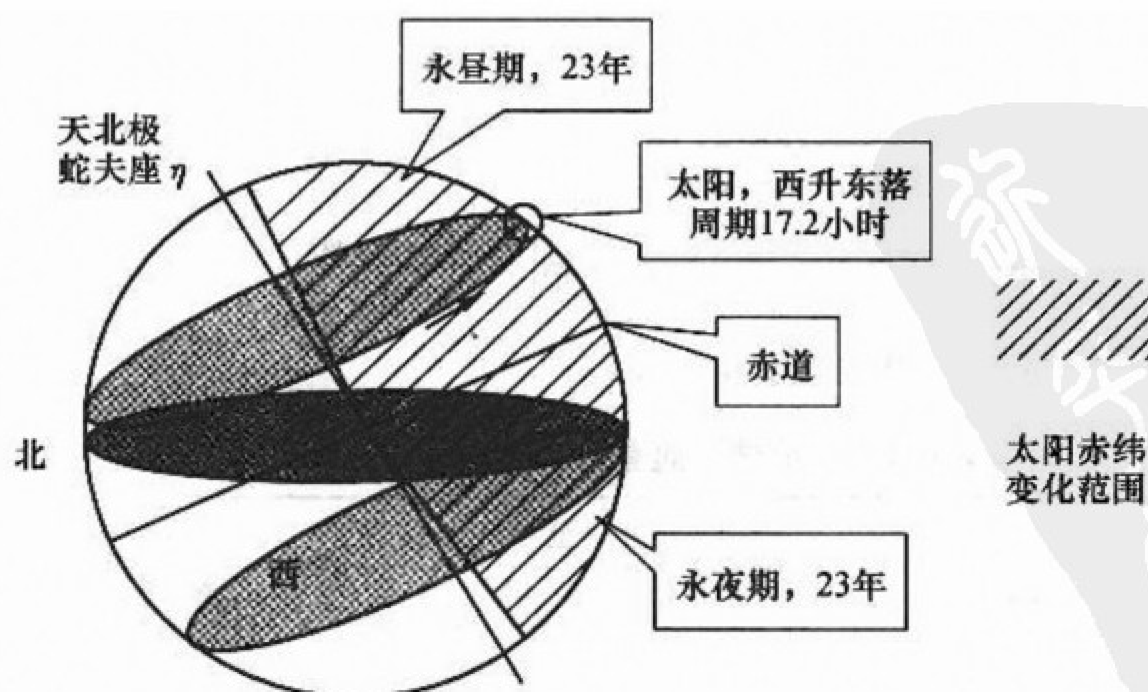


图 2.6.10　在天王星北纬 50°处太阳的周日运动

又进入一年前的“白夜”和永昼。这就是在天王星上空，“一年四季”（相当于83.7474个地球年）太阳出没的过程。

2.6.4 其他卫星和冥王星的情况

其他行星的卫星自转情况多数与月球相似：自转轴与轨道面垂直，自转周期与公转周期相同，也属“一面相对”的卫星。例如，火卫一、二，木卫一、二、三、四、五、九，土卫一、二、三、四、五、六、八、十、十一，天卫一、二、三、四、五，海卫一等。还有一些卫星观测资料不足，自转情况不甚明了。

冥王星自转轴倾斜57°.47，逆向自转，周期－6.387天。在冥王星的天空中，天体“西升东落”，太阳赤纬变化范围甚大。地理纬度超过32°.5即进入极圈，常年有昼夜的区域较小，昼夜长短变化突出，一年四季长达248.54地球年。冥王星不同纬度处永昼永夜的时间长短见表2.6.6。

表2.6.6 冥王星的永昼永夜时间长短

纬度/(°)	90	70	60	50	40	33	32.5
永昼/年	124	91.2	74	55.7	34.1	8.12	0

关于冥王星与查龙是否与地球上空的人造定点通信卫星那样互为定点天体（即两个天体刚性的连接在一起整体转动）的问题，尚无定论。互为定点天体应满足条件：①冥王星赤道面、查龙赤道面、查龙绕冥王星公转轨道面，三个平面共面；②冥王星自转、查龙自转、查龙绕冥王星公转，三个周期相等，而且都是逆向。三个平面是否共面，不同资料说法不一，有待于更多的观测，特别是将于2015年到达冥王星的美国新视野号冥王星探测器（new horizons explore Pluto）传来的信息（参见4.5.3小节）。



第 3 章　时间计量序列

人类分割了时间，而时间又催人奋进。

——伯尔尼，瑞士钟表博物馆

绝对的、真实的、数学的时间，由于它自身的本性，与任何外界事物无关的，均匀地流逝。

——牛顿，《自然哲学之数学原理》

当宇宙开始收缩时，时间不颠倒方向。人们会继续变老，所以不能指望等待宇宙收缩时去恢复你的青春。

——史蒂芬·霍金，《时间简史续编》

3.1　恒星时与平太阳时

3.1.1　恒星时

恒星时是由春分点的周日视运动来定义的。对于某一地方的子午圈，当春分点刚好通过子午线（上中天）的时刻，定义为该地恒星时 0^h。因周日视运动，春分点绕天球一圈，又一次通过子午线时，定义恒星时为 24^h 或次日恒星时 0^h。对任意时刻，将春分点的时角用时、分、秒单位来度量，定义为当时的恒星时。春分点的时角就是通过天极和春分点的大圆与子午圈的夹角 s（图 3.1.1）。设有某恒星 M，通过天极和 M 的大圆与子午圈的夹角 t 是该恒星的时角，α 是该恒星的赤经，显然有 $s=\alpha+t$。选择刚好在上中天的恒星，应有 $t=0$，于是 $s=\alpha$。结论是：某一恒星正在上中天的时候，该恒星的赤经就是当时的恒星时。如果有一台按恒星时走动的钟表，再用一架望远镜瞄准子午圈，观测每一颗上中天的恒星，就可以用它们的赤经来校正钟表指示的时刻。这就是天文测时的基本原理。当然测出来的时间是恒星时。

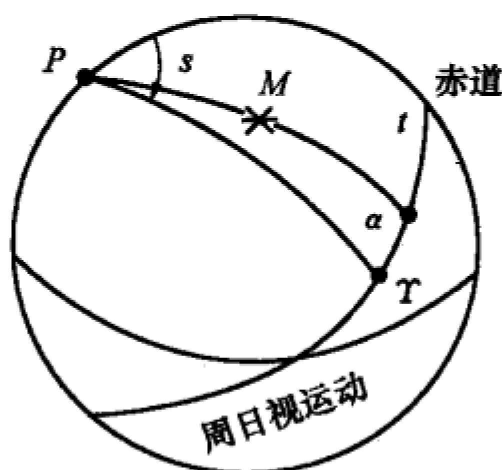


图 3.1.1　恒星时的定义

3.1.2　平太阳时

人们日常作息所使用的时间不是恒星时，而是太阳时。太阳时是由太阳的周

日视运动来定义的。与定义恒星时的做法类似，太阳刚好通过南方子午圈的时刻（太阳上中天）定义为太阳时 12^h。对任意时刻，将太阳的时角用时、分、秒为单位来度量，加上 12^h 后定义为当时的太阳时。因为太阳除了有周日视运动之外，还有周年视运动，所以太阳时与恒星时间隔不同。一个回归年有 365.242 2 太阳日，却有 366.242 2 恒星日，刚好相差一天，平均每天相差约 3^m56^s，即太阳时 24 小时比恒星时 24 小时长约 3^m56^s。恒星时是恒星周日视运动遵守的时间，太阳时是太阳周日视运动遵守的时间，日常生活使用太阳时。在寻找恒星的位置时，必须把太阳时换算到恒星时，才能与天球上的恒星位置相对应；天文测时通过恒星测量出恒星时，再经换算才能得到太阳时。

太阳时又分真太阳时与平太阳时。用真实太阳的时角计量的时间称真太阳时，由于太阳周年视运动是在黄道上，又由于椭圆轨道运动速度本身不均匀，真太阳的时角变化是很不均匀的。真太阳时像是一个蹩脚的钟表提供的时间，时快时慢，一年当中最大会差到 10 多分钟，这当然是不能接受的。天文学上设定一个假想的天体称为平太阳，它满足三个条件：①沿赤道做周年运动；②运动速度均匀；③运动周期等于一个回归年。以这个假想天体“平太阳”的时角定义的时间称为平太阳时，简称平时。实质上，平时是以地球自转周期（比物理周期稍长的一个周期）为基准定义的时间。只要回归年保持稳定，地球自转周期也保持稳定，平太阳时就是理想的均匀时间系统。20 世纪 70 年代以前，全世界共同使用的标准时间计量系统就是平太阳时，由国际计量大会决议，各成员国用法律形式颁行的平太阳时的 1 秒为法定时间计量单位。20 世纪 70 年代以后情况发生了变化，详见 3.6 节。

平太阳是假想的，只有理论上的依据，无法直接观测。天文台用天文学方法测定的仍然是恒星时，然后通过理论换算为平太阳时，这一过程称为测时。维持一个走时非常准确的钟表（恒星时、平时都可以，通常是二者兼备），不断地用测时结果来校正（当然，所谓校正并不是拨动钟表，而是记录下钟表的走时误差），同时用各种方法与其他天文台的钟表进行对比，随时可以提供全世界统一的、准确时刻，这一工作称为守时。把时间信号用通信设备，包括电台、电视台及其他专用设备向全世界发播，供民间和有关专业部门使用，这一工作称为授时。整个三部分工作统称为时间服务工作，是天文学为国计民生服务的重要项目之一。

3.2 区时与世界时

3.2.1 地方时与区时

恒星时或平时都以子午线为起算点，但地球上不同地理经度的地方，子午线

是不一样的。比如，太阳在北京过子午线的时候，在西安还没有过，而在东京已经过完了。无论恒星时还是平时都具有地方性，称为地方恒星时或地方平时。在赤道上，东西两地距离差464米，地方时间就差1秒，纬度越高距离差值越小。在北京的纬度上，东西每差355米，地方时就差1秒。严格地说，一个人沿东西方向站在地球上，他的两只脚所在地的时间都不一样，相差约1毫秒。

人们从事各种活动，进行社会交往，当然需要统一的时间，不能采用地方时。但如果全世界都采用同一标准时间，又会有很大的不方便。比如，当北京8点开始上班的时候，东京的太阳已经很高了，莫斯科离天亮还有3小时，而伦敦的夜总会玩兴正浓，美国人则刚刚同晚霞告别。为了解决全球各地时间异、同的矛盾，1884年华盛顿国际子午线会议决议，采用加拿大铁路工程师弗莱明(S. Fleming)的建议，全世界按统一标准划分时区，以英国格林尼治天文台0°经度线东西经度各7°.5的区域划为0时区，从0时区边界分别向东和向西，每隔经度15°划一个时区，东西各划12个时区，分别称为东1时区、东2时区……西1时区、西2时区……东12时区与西12时区相重合，全球一共24个时区。各时区都以中央经线的地方平时为本区的标准时间——区时。世界各地的标准时间分秒相同，时数只相差整数。目前，全世界大多数国家都采用区时，只有少数国家例外。如伊朗、印度、缅甸、新加坡、斯里兰卡和委内瑞拉，采用与区时相差半小时；圭亚那、利比里亚采用完全独立的地方时，它们那里的时间时、分、秒都与别处不同。中国地跨5个时区，中华人民共和国成立后统一采用东8区区时（即北京时间）。新疆维吾尔自治区曾一度单独采用东6区区时（铁路、民航除外），与北京时间相差2小时，但后来又恢复采用北京时间。在当地民间，特别是少数民族家庭中，有的仍保留着采用东6区区时（称为新疆时间）的习惯。北京时间只是一个名称，它是东经120°线上的地方时，并不是北京的地方时。北京的地理经度为东经116°19′，北京地方时比北京时间晚14.7分。全国恰好地处东经120°线上的城市只有山东青岛的胶南市和江苏常州市，其余都是农村、山野和海洋。本书光盘附录8列出了中国各大城市的地理经度及地方时与北京时间的差别。

3.2.2 世界时与国际日期变更线

有一些部门或专业领域，如天文、航海、航空、国际通信系统等，需要采用全世界统一的时间，通常采用0时区即格林尼治地方时，称为世界时，或格林尼治时间。

国际日期变更线是太平洋中经度180°线，简称日界线。日界线东西两侧是东12时区与西12时区重合的区域，时分秒是相同的，但日期相差一天。线的东边（美洲）是前一天，线的西边（亚洲和大洋洲）是后一天。由东向西越过日界

线，日期要增加一天，日历要多撕掉一天；由西向东越过日界线，日期要减少一天，日历要重贴上一天。为了照顾地跨 180°经度线两侧的同一国家（如俄罗斯东部）、岛屿或行政区域的方便，日界线有的地方偏离经度 180°线，形成一条折线。日界线西侧最靠东面的国家是太平洋中的岛国汤加王国和基里巴斯共和国，它们是每天最早迎接新一天到来的国家。基里巴斯由几个群岛组成，地跨 180°经度线两侧和南北半球，特别是东西方向从西经 150°到东经 170°，横跨经度达 40°，日界线无法绕过这个国家，只能从中间穿越。为了照顾这个不足 10 万人口的国家东西部居民在同一日期，商定其东部的莱恩群岛，虽在日界线以东，但仍采用日界线以西的日期，这里便成为全世界最早进入新一天日期的地方。其实这里的地理经度与美国的夏威夷相近，但日期却比夏威夷提前一天。

3.2.3 时间与地理经度的关系

同一地理经度的地方，不管南北半球，地方时都是一样的，包括地方平时和地方恒星时。要想知道某地的经度，只要测定当地的地方时，再与已知经度的地方时，包括区时和世界时比对，其差值就是两地的经度差。比对方法通常采用无线电通信对时。一些国家的电台或专门的时间服务台定时发播精确的时间信号，各地用无线电接收机就可以获得世界时或区时的准确时间。详见 3.6 节。

3.3 恒星时与平时的换算

3.3.1 时间间隔的换算

平太阳日与恒星日的关系参看图 3.3.1。太阳与春分点同时参加周日视运动。当春分点周日视运动一圈后回到原来位置，这段时间内太阳因周年视运动由位置 1 移到位置 2。在位置 2 上的太阳并没有到达原处，必须再走过一个角度 θ 才能到达，这就是太阳日间隔长于恒星日间隔的原因。每天长一个 θ 角，一个回归年后，太阳回到原处，刚好比春分点少走了一圈。于是有

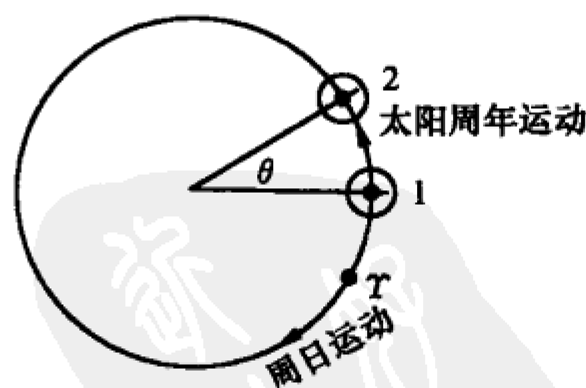


图 3.3.1 恒星日短于太阳日

回归年 = 365.242 2 平太阳日 = 366.242 2 恒星日

即

$$\frac{\text{平太阳日}}{\text{恒星日}} = \frac{366.2422}{365.2422} = 1.0027379$$

二者之差为

$$\begin{aligned}\text{平太阳日} - \text{恒星日} &= 0.0027379\ \text{恒星日}\\ &= 3\ \text{分}\ 56.56\ \text{秒(恒星时分秒)}\end{aligned}$$

或

$$\begin{aligned}平太阳日-恒星日 &= 0.0027304\,平太阳日 \\ &= 3\,分\,55.91\,秒(平时分秒)\end{aligned}$$

二者的换算关系为

$$平太阳日(或时、分、秒) = 1.0027379\,恒星日(或时、分、秒)$$
$$恒星日(或时、分、秒) = 0.9972696\,平太阳日(或时、分、秒)$$

粗略地说，恒星时与平时每天相差约 4 分钟，一年刚好差一天。

恒星日是地球相对于恒星的自转周期，即地球自转的物理周期；而太阳日是地球相对于太阳的自转周期，即昼夜变化的周期。两者的差异是由地球公转造成的。这一现象在其他行星也同样存在。例如水星的公转周期为 87.969 日，自转的物理周期为 58.646 日，恰好等于公转周期的 2/3（这种情况类同于月球总以一面对着地球的情况，称为周期的共振，其形成机制有力学上的原因）。那么，水星上的一昼夜有多长呢？参看图 3.3.2，当水星在 t 时间内由位置 1 公转到位置 2 时，公转转过的角度 $a=2\pi t/T_g$，自转转过的角度 $b=2\pi t/T_z$，T_g、T_z 分别是公转和自转的周期。同一时间内，水星相对于太阳转过的角度$b-a=2\pi t\left(\frac{1}{T_z}-\frac{1}{T_g}\right)$。那么，水星相对于太阳的自转周期，即昼夜长短应等于 $b-a$ 积累到 2π 所需要的时间 ΔT，显然 $\Delta T=2\pi t/(b-a)$，现已知 $T_z=\frac{2}{3}T_g$，则不难算出 $\Delta T=2T_g=175.938$ 日。水星上的一昼夜居然有两"年"那么长。以上计算实际上是一种行星会合周期的计算，参见 4.3 节。

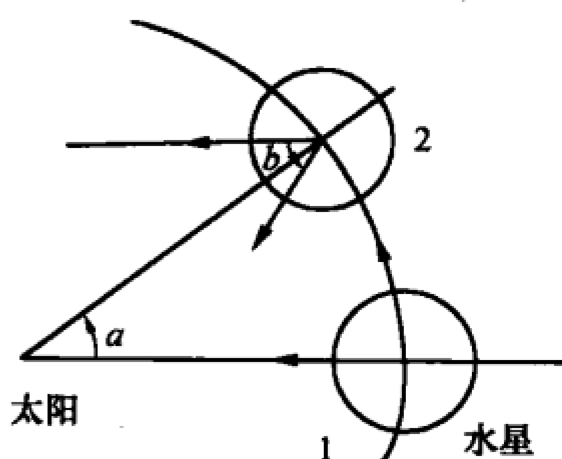


图 3.3.2 水星昼夜长短的计算

3.3.2 时刻的换算

平时和恒星时都可以用来度量时间。确定某一事件发生的时刻（简称物理时刻）可用某地的平时的几点几分几秒，也可用恒星时的几点几分几秒，参见图 3.3.3，设在格林尼治地方，春分点 ♈ 与平太阳$\overline{\odot}$都是赤道上的两个点，依恒星时 s 的定义有

$$s = R_u + t_{\overline{\odot}}$$

R_u 是平太阳的赤经。依平太阳时的定义有

$$u_T = 12^h + t_{\overline{\odot}}$$

u_T 是世界时即格林尼治地方的平太阳时，$t_{\overline{\odot}}$是平太阳的时角。于是可得

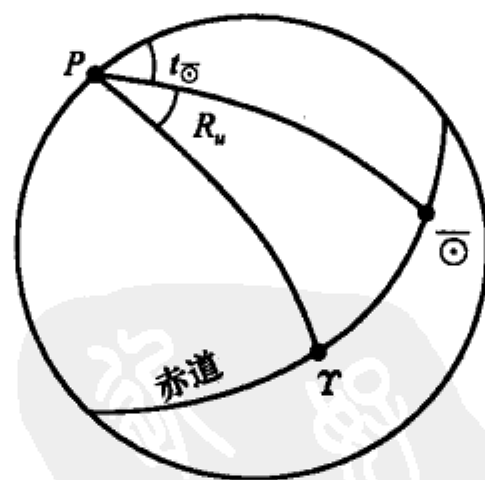


图 3.3.3 平时与恒星时的关系

$$s = R_u + u_T - 12^h$$

这就是格林尼治地方恒星时与平时的换算公式。对其他地方，将 u_T 换为该地的地方平时，s 为该地地方恒星时，换算公式是同样的。平太阳是一个理论上假想的点，它的赤经由下式来严格定义：

$$R_u = A + PT_u + QT_u^2 + RT_u^3$$

其中

$$A = 18^h 41^m 50^s.548\,41$$
$$P = 8\,640\,184^s.812\,866$$
$$Q = 0^s.093\,104$$
$$R = -6^s.2 \times 10^{-6}$$
$$T_u = (\mathrm{JD} - 2\,451\,545.0)/36\,525$$

JD为儒略日（从公元前 4713 年 1 月 1 日世界时 12^h 起算的日数）。式中唯一的变量就是 T_u——以 100 年为单位的不断流逝的时间，起算点是 2000 年 1 月 1 日世界时 12 时，这时的 JD=2 451 545.0，$T_u=0$。

由恒星时与平时的关系式，只有当平太阳赤经 $R_u=12^h$ 的那一时刻，才有$s=u_T$，世界各地的平时与恒星时相重合。这一时刻由 R_u 定义式加以计算，每年只出现一次，在秋分节气前后。在其他时刻，平时与恒星时都不一致，需要用公式加以换算。

严格的换算相当麻烦，在精度要求不高时，可以采用以下近似的方法：

认为 R_u 公式中每年元旦中午 12 时 $T_u=0$，这时的 $R_u=A\approx18^h42^m$，$u_T=12^h$，相应的恒星时

$$s = R_u + u_T - 12^h = 18^h 42^m$$

往前推 12 个（平时）小时，即为元旦子夜时（平时 0^h）的恒星时。由于恒星时与平时间隔每天差 4^m，12 小时差 2^m，故元旦子夜时的恒星时应为 18^h42^m 之前的 12 小时又 2 分钟，即 6^h40^m。这就是每年元旦那一天子夜，恒星时与平时的差，也称为平时 0 时的恒星时 s_0。在其他日期，按每天加 3^m56^s 或 $3^m.94$ 计算

$$s_0 = 6^h 40^m + 3^m.94d$$

d 是从元旦起算的天数。例如 1 月 28 日，$d=27$，则

$$s_0 = 6^h 40^m + 27 \times 3^m.94 = 8^h 26^m$$

又如 3 月 21 日，$d=79$，则

$$s_0 = 6^h 40^m + 79 \times 3^m.94 = 11^h 51^m$$

s_0 是世界各地平时 0 时的恒星时。对于业余天文观测来说，这样的精度已经够了。对于专业工作，需要精确值的，可以按 R_u 的定义式加以计算，也可查每年出版的《天文年历》恒星时与平时换算表查出。

3.3.3 天体时角的换算

天体时角 t 的公式为

$$t = s - \alpha$$

式中，α 是天体的赤经，s 是地方恒星时。$s=s_0+T_d$，s_0 是当天平时 0^h 的恒星时，T_d 是地方平时（严格说应化为恒星时单位，即乘以因子 1.002 737 9）。T_d 与区时的差是当地经度与区时标准经度之差化为时分秒单位。北京时间的标准经度是东经 120°，设当地经度为 λ，则 T_d 与北京时间之差 $\Delta T=120°-\lambda$，化为时分秒单位。最后公式为

$$t = s_0 + T - \Delta T - \alpha$$

T 是区时（北京时间）。

例如，（见 2.3.3 小节）已知英仙座 α 星的赤经 $\alpha=3^h23^m$，某年 8 月 10 日（适合业余使用的近似计算，年与年之间的差别略去不计）北京时间 4^h，天津（东经 117°.2，北纬 39°.1）所见该星的时角为

$$t = 6^h40^m + 221 \times 3^m.94 + 4^h - 11^m.2 - 3^h23^m = 21^h37^m$$

$11^m.2$ 是天津经度与 120°之差化为时分的数，$6^h40^m+221\times3^m.94$ 是 8 月 10 日平时 0 时的恒星时。为计算方便，请使用本书光盘附录 7 和光盘附录 8 所提供的数据。

3.4　历　　法

3.4.1　现行公历

现行公历又称格里历，它是公元 1582 年由罗马教皇格里哥里十三世（Gregory XIII）颁行的。它的前身是儒略历。儒略历是公元前 46 年古罗马统帅儒略·恺撒（Julius Caesar）采纳天文学家索西琴尼（Sosigenes）的意见制定的。儒略历每年分 12 个月，逢单的月份为大月，31 天；逢双的月份为小月，30 天。每年的天数为 31×6+30×6=366 天，为了与年长 365.25 天相调和，4 年中设 1 个闰年，3 个平年。闰年 366 天，平年在 2 月份扣掉一天，为 365 天，平均年长 365.25 天。恺撒的生日在 7 月，月名以其名 July 命名。公元前 44 年恺撒死后，他的养子屋大维继承罗马统治地位，号称奥古斯都（Augstus）大帝，因其生日在 8 月，公元前 8 年他下令把 8 月由小月改为大月，31 天，并以 August 命名；9 月、11 月改为小月，30 天；10 月、12 月改为大月，31 天。这样每年又多出一天，索性将 2 月份再扣除一天，变为闰年 29 天，平年 28 天，平均年长仍为 365.25 天。改动以后的儒略历也称旧历，一直沿用到公元 1582 年改行新历即格里历。改历的原因是复活节的日期问题。复活节是基督教纪念耶稣（Jesus）死后三日又复活的节日。教义规定每年春分以后的第一个月圆之后的第一个星期日为复活节。公元 325 年罗马帝国尼西亚基督教大会决定，春分日定在每年 3 月 21 日。由于儒略历一年为 365.25 日，与回归年的自然周期 365.242 2 日有一个差数，积 128 年满一天。从 325 年累积到 1582 年已长达 10 天，使儒略历中的春分日期 3 月 21 日与教义规定用于计算复活节的真正自然的春分日期偏离太远，于是格里哥里十三世下令，把旧历 1582 年 10 月 4 日的下一天定义为新历的 10 月 15 日，中间缺掉 10 天，使天文上的春分日又重新与历法中的日期 3 月 21 日相吻合。为了以后不再累积这种偏离，将闰年规则加以修改，使在 400 年中少闰 3 次。新规则规定：凡公元年数能被 4 除尽的年为闰年，除不尽的年为平年；但对整世纪年如 1600，1700……只有世纪数也能被 4 除尽的才是闰年，其余的虽然年数都能被 4 除尽，但仍为平年。比如 2000 年是闰年，1900 年就不是闰年。调整后的新历，每 400 年中有 97 个闰年，共有 400×365+97=146 097 日，与

真正的回归年 400×365.242 2＝146 096.88 日，400 年只差 0.12 日，需累积 3 300 多年才满一天，准确度已经够用了。格里历一直沿用到今天，为世界各国普遍采用，称为公历。在基督教内部，因教派分歧，英国至 1752 年才改行新历，而东正教一直不服从罗马教皇的决定，拒不改行新历，连复活节都各过各的，互不迁就。十月革命发生在 1917 年新历 11 月 7 日，但俄罗斯东正教的俄历，那一天是 10 月 25 日，“十月革命”的名称由此而来。中国于辛亥革命后在 1912 年开始采用公历，但用中华民国纪年。1949 年中华人民共和国成立后，改用公元纪年。

3.4.2 中国农历

中国农历是 1911 年辛亥革命前实行的传统历法，已有几千年的历史。它对年、月和节气的安排完全以月相盈亏和太阳周年视运动两个自然周期为依据，没有人为的干预。

中国农历历法规定：以月相朔所在的那一天为每月的初一，下次朔的日期为下一月初一。朔望周期不是日的整倍数，平均为 29.530 59 日，月长便有大有小，大月 30 天，小月 29 天。朔望周期本身也长短不一，相差近半天，所以可能会出现连续几个大月或连续几个小月的情况。朔日到底在哪一天，要根据月亮和太阳的真实位置来确定，古时称为“定朔”，是一项专业性很强、很复杂的工作。即使在现代条件下，精确计算太阳和月亮的位置，仍然是一件很麻烦的事。获得一个月亮黄经的精确值，需要经过几千项的数据处理程序。

中国农历的年仍以回归年为依据。但回归年周期与朔望周期不能通约。中国农历通过置闰的办法调节年与月两个自然周期，并以廿四节气补充调和月亮与太阳两个天体运动的自然节律，相当科学和完备地指导农业生产和人民生活，既照顾了阴（太阴，即月亮）也照顾了阳（太阳），所以是一种阴阳历。公历弃朔望周期于不顾，只考虑回归年一种自然周期，所以属于太阳历（阳历），一些民族的历法，如伊斯兰回历，只考虑月相周期，不顾太阳运动，属太阴历（简称阴历）。

积 12 个朔望月为 354 日或 355 日，与回归年相差 11 日左右，3 年累积已超过 1 个月。调节的办法就是安排 1 个闰月，使这年有 13 个月，称为置闰。置闰的规则根据廿四节气来定，廿四节气是太阳周年视运动黄经每 15°的 24 个时刻。从冬至开始，每隔 1 个节气称为中气，共有 12 个中气：冬至、大寒、雨水、春分、谷雨、小满、夏至、大暑、处暑、秋分、霜降、小雪。如果某个朔望月中不包含中气，这个月份就不是正规的月份，而算做上一月的闰月。每一回归年只有而且必定有 12 个中气，与中气相配的 12 个正规的月份命名为正月、二月……十二月。用置闰的办法解决了回归年与朔望月之间的调节问题。至于哪个中气所在

的月为正月，各个朝代有所不同（表3.4.1）。从冬至开始，12个中气分别与十二地支：子丑寅卯辰巳午未申酉戌亥相匹配，称为月建，正月为岁首。夏朝以建寅之月为岁首，商朝以建丑之月为岁首，周朝以建子之月为岁首，秦朝以建亥之月为岁首。汉武帝太初元年（公元前104年）五月颁行太初历，岁首依夏历，设在建寅之月，即雨水所在的月份。以后除东汉王莽、三国魏明帝曹睿、唐武则天、唐肃宗李亨曾短时期有所改动外，一直沿用到现代，均以建寅之月为岁首，即以雨水所在的月份为正月。

表3.4.1 历代月建表

中气	月建	夏	商	周	秦	汉
冬至	子	十一	十二	正	二	十一
大寒	丑	十二	正	二	三	十二
雨水	寅	正	二	三	四	正
春分	卯	二	三	四	五	二
谷雨	辰	三	四	五	六	三
小满	巳	四	五	六	七	四
夏至	午	五	六	七	八	五
大暑	未	六	七	八	九	六
处暑	申	七	八	九	十	七
秋分	酉	八	九	十	十一	八
霜降	戌	九	十	十一	十二	九
小雪	亥	十	十一	十二	正	十

节气以角度均分，时间间隔并不均匀。地球过近日点（冬至与小寒之间，1月4日前后）附近，运动速度快，跨15°的时间短，节气间隔时间就短，朔望月长度超过2个中气之间的间隔，不大可能发生闰月；地球过远日点（夏至与小暑之间，7月6日前后）附近，运动速度慢，跨15°的时间长，节气间隔时间较长，朔望月长度不足两个中气之间的间隔，发生闰月的机会甚多。闰月多发生在四至八月，二月、三月、九月、十月少有发生，十一月至正月出现闰月是极为罕见的。如闰十一月自明崇祯十五年（公元1642年）有过一次以来，至2033年才又出现一次；闰十二月自明万历二年（公元1574年）有过一次，闰正月自明崇祯十三年（公元1640年）有过一次以来，直至公元2100年，还一次都没有。

有一点需补充说明：平均而言，朔望月长度小于中气之间的间隔，但在地球过近日点附近，朔望月长度常常会大于中气间隔。这时仍有可能出现一个月中没有中气的情况（图3.4.1）。但这时一定会在附近月份中出现两个中气。于是补充规定，如果某一个朔望月中有两个中气，那么在该月份之后的一或两个月中，那个没有中气的月份便不算闰月，仍是正常月份。例如，1984～1985年农历乙

丑年正月没有中气，但前一年甲子年十一月却有两个中气，所以乙丑年正月仍属正常月份不是闰月。按前面所说的，以中气“雨水”所在的月份为正月，而这一年的正月偏偏没有中气，中气雨水跑到上一年的十二月份中去了，这不是与“正月”的定义相矛盾吗？答案为：不然。这恰好表现了中国农历尊重自然规律，在不违反原则的前提下，调和局部矛盾的灵活性。因为原则是：一年有 12 个中气，这是太阳周年视运动的规律，而一年有 12 个正常的朔望月，与中气数相符。局部矛盾表现在：朔望月的自然周期长短不齐，造成一个月中出现两个中气的情况。出现这种情况时，必然另有一个相邻的月份没有中气，把这个没有中气的月份不算闰月，仍看成是正常月份。如乙丑年正月没有“雨水”，仍为正月，矛盾就自然解决了。而且这种情况是偶然巧合才出现的，好多年才会赶上一次。

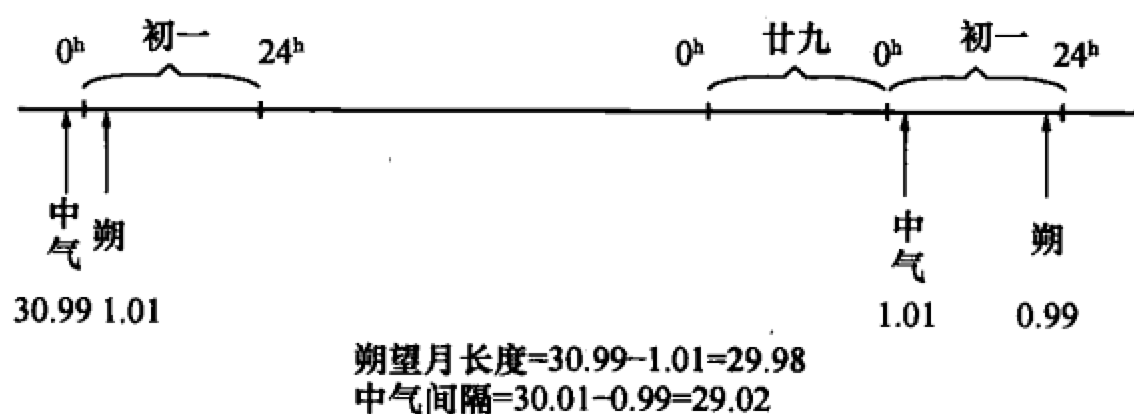


图 3.4.1 中气与朔望月

中国农历兼顾日月，源远流长，包含着比公历更多的自然信息，功能也更加丰富。廿四节气不仅能调和阴阳，而且能更准确地指导农时。公历不顾月相，中国农历与月相有明确关系。月相不仅是人类抒发感情的重要对象，也与人类生产活动相关。如夜晚利用月亮照明；月亮位置同海洋潮汐的密切关系对指导渔业生产至关重要；月相周期同某些生命活动周期及人的生理周期有关等。中华民族的一些传统节日如春节、端午、中秋等都是根据农历来确定的。

农历的缺点：一是年长不是定数，遇有闰月，每年要多发一个月的工资；二是定朔和置闰都需专业人员确定，大小月没有规律，不便民间推算。

3.4.3 纪年和儒略日

公历纪年以“基督诞生”为起点，但这不是儒略历所原有的，而是公元 532 年一位教士狄奥尼西倒推出来建议采用的。基督（即耶稣）诞生的真实年代，无论从历史还是从教义上都属悬案，无从查考。中国古代纪年系用帝王的年号。从汉武帝至清宣统，年号共有 700 多个，有的一帝多号，也有朝代不同年号相同，用起来不大方便。辛亥革命后改用中华民国纪年，中华人民共和国成立后改用公元纪年。

由于历法中年和月的长度都不固定，天文学上为了计算很长的时间间隔使用

了一种以日为单位的算法，它的依据就是儒略日。它不要年、月，直接按日的顺序记数，起点是公元前 4713 年 1 月 1 日格林尼治平时 12 时，代号 JD。比如，1997 年 10 月 1 日北京时间 14 时的儒略日数为 JD2 450 722.75 日。这一纪法是 16 世纪莱顿的一位教授斯卡里格尔（Scaliger）提出来的，为纪念他的父亲儒略命名，与凯撒大帝及儒略历无关。儒略日与历日的对照表载在各国天文历书上。

中国有一套比儒略日更古老的连续纪日系统就是干支纪日，从殷商时代就已开始。有确切文献记载的是从鲁隐公三年（公元前 722 年）至宣统三年至今，2 700 多年连续纪日，没有间断。儒略日是倒推出来的，历史上并无依据，而干支纪日是真实的历史记载，是中华民族宝贵的文化遗产之一。

3.4.4　干支纪法

干支就是甲、乙、丙、丁、戊、己、庚、辛、壬、癸 10 个天干和子、丑、寅、卯、辰、巳、午、未、申、酉、戌、亥 12 个地支。天干和地支按序搭配，共 60 个顺序，又称“六十花甲子”，周而复始，循环使用。干支最早用来纪日，以后也用来纪年、纪月、纪时。人出生时的年、月、日、时 4 组干支共 8 个字就是所谓的“生辰八字”。下面介绍它们的算法。

1. 干支纪年

干支纪年从东汉章帝元和二年（公元 85 年，乙酉年）四分历开始。公元年数与年的干支可用下述方法加以换算。首先，对天干和地支分别给以序号（表 3.4.2）。

表 3.4.2　干支序号表

干　支	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
天干	庚	辛	壬	癸	甲	乙	丙	丁	戊	己		
地支	申	酉	戌	亥	子	丑	寅	卯	辰	巳	午	未

对于任一公元年数：

天干序号 = 公元年尾数

地支序号 =（公元年数 /12）的余数

例 1　公元 2015 年，天干序号=5，天干为乙；地支序号=(2015/12）的余数=11，地支为未。公元 2015 年为乙未年。

例 2　公元 762 年，天干序号=2，天干为壬；地支序号=(762/12）的余数=6，地支为寅。公元 762 年为壬寅年。

对于公元前年数，因为没有公元 0 年，公元前 n 年在数学上应为 $-n+1$ 年，所以计算公式应改为

天干序号 =－（公元前年尾数）＋11，如大于等于 10，则减 10

地支序号 =（－（公元前年数）＋1）/12 的余数＋12，如等于 12，则为 0。

例 3 公元前 10 年，天干序号＝－0＋11＝11，天干序号为 1，天干为辛；地支序号＝(－10＋1)/12 的余数＋12＝－9＋12＝3，地支为亥。公元前 10 年为辛亥年。

例 4 公元前 221 年，天干序号＝－1＋11＝10，天干序号为 0，天干为庚；地支序号＝(－221＋1)/12 的余数＋12＝－4＋12＝8，地支为辰。公元前 221 年为庚辰年。

反过来，若已知年的干支，可以计算相应的公元 1～60 年的年数，公式为

$$公元年数 = 6 \times 天干序号 - 5 \times 地支序号$$

如得 0 或负值则加 60。

例 5 已知干支为癸丑，公元年数＝6×3－5×5＝－7，加 60 为公元 53 年。

例 6 已知干支为庚申，公元年数＝6×0－5×0＝0，加 60 为公元 60 年。

在公元 1～60 年数字上加任意 60 的正整倍数，或减任意正整倍数再减 1，仍为同一干支年。如公元 53 年为癸丑年，53＋60＝113，53＋30×60＝1853，或 53－60－1＝－8，53－10×60－1＝－548，即公元 113 年、1853 年、公元前 8 年、公元前 548 年都是癸丑年。

有一点需要注意：公元年与干支年起点不同。在公元已进入新年，而干支仍属旧年，即公历元旦至农历春节这一段时间，要特别小心公元年与干支年有一年之差。

2. 干支纪月

干支纪月比较简单，因为 1 年 12 个月（不算闰月），刚好与 12 地支搭配，各月的地支是固定不变的。月的天干与年的天干有关，可从表 3.4.3 依据年的天干和月份查出。

表 3.4.3 纪月干支表

月 份	月的天干					月的地支
	年的天干：戊癸	甲己	乙庚	丙辛	丁壬	
1	甲	丙	戊	庚	壬	寅
2	乙	丁	己	辛	癸	卯
3	丙	戊	庚	壬	甲	辰
4	丁	己	辛	癸	乙	巳
5	戊	庚	壬	甲	丙	午
6	己	辛	癸	乙	丁	未
7	庚	壬	甲	丙	戊	申
8	辛	癸	乙	丁	己	酉
9	壬	甲	丙	戊	庚	戌
10	癸	乙	丁	己	辛	亥
11	甲	丙	戊	庚	壬	子
12	乙	丁	己	辛	癸	丑

例 7　公元 2015 年（乙未年）农历三月，因年的天干为乙，故月的天干为庚，干支为庚辰。闰月的干支以当月所含节气（闰月没有中气，只有节气）时刻分界，交节前属上月干支，交节后属下月干支。

3. 干支纪日

日的干支从鲁隐公三年（公元前 722 年）至今，由史书逐日记录，没有间断。从公历日期也可以准确推算日的干支，但公式比较复杂，一般从历法工具书（如紫金山天文台编的《二百年历表》）查出。如公元 2015 年 5 月 1 日，为农历乙未年三月十三，日的干支是丁丑。

4. 干支纪时

干支纪时类似干支纪月，将每天分为 12 个时辰，直接以 12 地支命名，所以各时辰的地支是固定不变的。时的天干与日的天干有关，可从表 3.4.4 依据日的天干和小时数查出。

表 3.4.4　纪时干支表

小　时	时的天干					时的地支
	日的天干：甲己	乙庚	丙辛	丁壬	戊癸	
23～1	甲	丙	戊	庚	壬	子
1～3	乙	丁	己	辛	癸	丑
3～5	丙	戊	庚	壬	甲	寅
5～7	丁	己	辛	癸	乙	卯
7～9	戊	庚	壬	申	丙	辰
9～11	己	辛	癸	乙	丁	巳
11～13	庚	壬	甲	丙	戊	午
13～15	辛	癸	乙	丁	己	未
15～17	壬	甲	丙	戊	庚	申
17～19	癸	乙	丁	己	辛	酉
19～21	甲	丙	戊	庚	壬	戌
21～23	乙	丁	己	辛	癸	亥

例 8　公元 2015 年 5 月 1 日（丁丑日）中午 12 时对应的地支是午，丁丑日的天干为丁，故时的天干为丙，干支为丙午。

综合以上年、月、日、时的干支，公元 2015 年 5 月 1 日中午 12 时出生的人，其“八字”为：“乙未庚辰丁丑丙午”。

用以上方法，根据出生的公元年和农历的月、日及时辰，可以得知其“八字”。人的生辰八字总的花样数，等于 4 位六十进制数从全 0 到全 59 的花样数，

即 60^4 =1 296 万。全球或全中国甚至中国的一个省的人口中，肯定会出现八字完全相同的人。

有读者反映，查纪日干支的工具书很难找到，希望给出从公历日期推算纪日干支的方法。下面给出本书编著者自创的方法，可算出自现行公历格利哥里历颁行以后任一公历日期的干支。

格利哥里历颁行的日期是 1582 年 10 月 15 日，纪日干支的以下算法从 1583 年 1 月 1 日开始。从古代日食资料查出，1582 年 12 月 25 日曾发生日环食，那一天的干支是“乙酉”，由此推算出 1583 年 1 月 1 日的干支是“壬辰”。

定义 1583 年 1 月 1 日的“日序”为 0（1 月 2 日的日序为 1，以下类推）。

先计算此后任一公元年 1 月 1 日的日序 X_y：

$$X_y = 365 \times D + (D+2)/4 \text{ 的整数} - P$$

式中 D=(公元年−1583)，P 是“400 年少闰 3 次”的改正量，在 1600 年 3 月 1 日以后才予以考虑，此前的 P 值一律为 0

$$P = (yy - 16) - (yy - 16)/4 \text{ 的整数}$$

yy 是公元年/100 的整数。在公元 9999 年以前，yy 其实就是公元年的前两位数。只有在跨世纪年，如 1700、1800 年等，P 值才有变化。必须注意：任意一年的 1、2 月份要按前一年对待，如 1900 年的 1、2 月份，仍按 1899 年对待，P=(18−16)−(18−16) /4 的整数=2。从 1900 年 3 月至 2100 年 2 月，这 200 年期间，P 值都是 3。

例 9 公元 2009 年，D=2009−1583=426，(D+2)/4 的整数=107，yy=20，P=(20−16)−(20−16)/4 的整数=4−1=3，所以 2009 年 1 月 1 日的日序

$$X_y = 365 \times 426 + 107 - 3 = 155\,594$$

再计算一年中每月 1 日以 0 为起点的日序 X_m：

$$X_m = 30 \times (m-1) + Q$$

式中 m 为月份，Q 为不同月份的增加值，按平年和闰年查表 3.4.5 得出

表 3.4.5 计算日序 X_m 的 Q 值表

平年月份	3	1，4，5	2，6，7	8	9，10	11，12	—
闰年月份	—	1，3	2，4，5	6，7	8	9，10	11，12
Q 值	−1	0	1	2	3	4	5

例 10 平年 5 月份，Q=0，X_m=30×(5−1)+0=120。

再计算每月 d 日以 0 为起点的日序 X_d：

$$X_d = (d-1)$$

例 11 28 日，$X_d=(28-1)=27$

最后，公元某年月日的日序为：

$$X_{ymd} = X_y + X_m + X_d$$

例 12 2009 年 5 月 28 日的日序＝155 594＋120＋27＝155 741。

根据日序，计算日的干支，公式为

天干序号 ＝ 日序尾数 ＋2,如大于等于 10,则减 10；

地支序号 ＝（日序 /12）的余数 ＋8,如大于等于 12,则减 12。

例 13 2009 年 5 月 28 日的日序尾数为 1，天干序号＝1＋2＝3，查表 3.4.2 干支序号表，天干为癸；（日序/12）的余数＝（155 741/12）的余数＝5，地支序号＝5＋8－12＝1，查表 3.4.2 干支序号表，地支为酉。纪日干支为癸酉。

例 14 公元 1762 年 10 月 17 日，D＝1 762－1 583＝179，P＝(17－16)－(17－16)/4 的整数＝1，X_y＝365×179＋45－1＝65 379 ，X_m＝30×(10－1)＋3＝273，X_d＝(17－1)＝16，日序＝65 379＋273＋16＝65 668。天干序号＝8＋2－10＝0，天干为庚：（65 668/12）的余数＝4，地支序号＝4＋8－12＝0，地支为申。纪日干支为庚申。

例 15 公元 10364 年 7 月 14 日，D＝10 364－1 583＝8 781，P＝(103－16)－(103－16)/4 的整数＝66，X_y＝365×8 781＋2 195－66＝3 207 194，X_m＝30×(7－1)＋2＝182，X_d＝(14－1)＝13，日序＝3 207 194＋182＋13＝3 207 389。天干序号＝9＋2－10＝1，天干为辛；（3 207 389/12）的余数＝5，地支序号＝5＋8－12＝1，地支为酉。纪日干支为辛酉。当然，现行公历的使用寿命能否延长到这时，那又另当别论了。

用以上方法不仅能计算纪日干支，还可直接计算历史事件之间相隔的准确天数。例如从辛亥革命（1911 年 10 月 10 日）到中华人民共和国成立（1949 年 10 月 1 日）相隔的天数：

辛亥革命的 D＝1 911－1 583＝328，P＝3，Q＝3，

$$X_{ymd} = 365 \times D + (D+2)/4\text{ 的整数} - P + 30 \times (m-1) + Q + (d-1)$$
$$= 120\,081$$

中华人民共和国成立的 D＝1 949－1 583＝366，P＝3，Q＝3，

$$X_{ymd} = 365 \times D + (D+2)/4\text{ 的整数} - P + 30 \times (m-1) + Q + (d-1)$$
$$= 133\,952$$

两者之差＝13 871，即从辛亥革命到中华人民共和国成立相隔 13 871 天。

3.5 黄道13星座与星座算命

无论中外，古代人们虽然不知道地球公转，却早就掌握了太阳在众星之间周年视运动的规律。中国古代的青龙、白虎、朱雀、玄武和二十八宿，即是黄道附近众星群的名称。古巴比伦人把太阳行经的诸恒星划分为12个星座，并以想象中的动物或神话人物来命名，称为黄道12星座。这是西方星座划分最早的来源。以后到古希腊、古罗马时代，北部天空的几十个星座逐渐固定下来，17世纪航海大发现以后又把南天的一些星座补充完全。19世纪中期，英国天文学家威廉·赫歇尔（W. Herschel）最早建议以赤经、赤纬线划分星座区域。1929年，国际天文学联合会为了现代天文学研究的方便，以传统的星座划分和名称为基础，以1875.0天球赤道坐标系的赤经、赤纬线为界，明确地将全天空划分为88个星座区域，用拉丁文规定其名称和由三个明确大小写的字母组成其缩写符号，全世界的天文研究领域都统一使用。中国天文学会确定了汉字的星座译名，无论大陆、台湾和港澳地区至今都共同遵守（见光盘附录1）。黄道12星座的汉字名称和缩写符号为：白羊（Ari）、金牛（Tau）、双子（Gem）、巨蟹（Cnc）、狮子（Leo）、室女（Vir）、天秤（Lib）、天蝎（Sco）、人马（Sgr）、摩羯（Cap）、宝瓶（Aqr）、双鱼（Psc）。

事实上，按现代天文学对星座区域的正规划分，黄道穿过的星座不是12个而是13个，即在天蝎和人马之间还有一个蛇夫座（Oph），各星座大小参差不齐，蛇夫座跨黄道的范围要比天蝎座大一倍多（光盘图3.5.1 黄道13星座图之一）（光盘图3.5.2 黄道13星座图之二），加之地球公转是在椭圆轨道上运动，太阳周年视运动的速度是不均匀的。所以太阳在每个星座里停留的时间长短不一。每年春分时刻太阳从春分点出发，在黄道13星座中穿行一周又回到春分点，这是一年四季温度变化的自然周期——回归年。而春分点又沿着与太阳周年视运动相反的方向做缓慢的岁差运动（详见2.5节），由于岁差，每“年”的同一日期，太阳在星座中的位置都有微小变化。年深日久，各个月份太阳所在的星座也就易位了。在古希腊时代，春分点位于白羊座，到2000年，已经跑到了双鱼座中靠近宝瓶座的地方。也就是说，春分节气时的太阳位置已经不在古希腊时代的白羊座，而跑到了双鱼座中靠近宝瓶座的地方。

表3.5.1是现时代每年太阳进入黄道13星座的准确时间，概据2000历元星图坐标计算。由于历法不够精准，有闰年、平年的不同，而中国的二十四节气与太阳黄经是准确对应的。星座位置与黄经的关系仅受岁差的影响，每年大约延后20分钟，约70年延后一天。表中所列太阳进入各星座的时刻与12个中气时刻的时间间隔，基本上不会变化，但各年的公历日期和北京时间，可能会有一天以

内的误差，表中只给出 1999 年太阳进入各星座的时刻。

表 3.5.1　太阳每年进入黄道 13 星座的时刻

星　座	与中气相隔的时间	黄经范围	停留时间	1999 年日期	北京时间
摩羯	大寒前 0 天 15 时 46 分	28°16′	27 天 21 小时	1 月 20 日	4 时 51 分
宝瓶	雨水前 2 天 9 时 11 分	24°34′	24 天 11 小时	2 月 17 日	1 时 36 分
双鱼	春分前 7 天 20 时 58 分	36°09′	36 天 15 小时	3 月 13 日	12 时 48 分
白羊	谷雨前 1 天 17 时 19 分	25°16′	26 天 0 小时	4 月 19 日	3 时 27 分
金牛	小满前 6 天 16 时 0 分	36°25′	38 天 0 小时	5 月 15 日	3 时 52 分
双子	夏至前 0 天 0 时 2 分	27°56′	29 天 7 小时	6 月 22 日	3 时 47 分
巨蟹	大暑前 2 天 3 时 50 分	20°24′	21 天 8 小时	7 月 21 日	10 时 54 分
狮子	处暑前 12 天 3 时 5 分	35°33′	36 天 18 小时	8 月 11 日	18 时 46 分
室女	秋分前 6 天 6 时 15 分	44°10′	44 天 17 小时	9 月 17 日	13 时 17 分
天秤	霜降后 8 天 1 时 32 分	22°08′	22 天 0 小时	11 月 1 日	6 时 24 分
天蝎	小雪后 0 天 4 时 25 分	7°24′	07 天 7 小时	11 月 23 日	6 时 49 分
蛇夫	小雪后 7 天 11 时 53 分	18°30′	18 天 5 小时	11 月 30 日	14 时 18 分
人马	冬至前 3 天 20 时 19 分	33°15′	32 天 10 小时	12 月 18 日	19 时 25 分

近几年来，西方文化的糟粕“星座算命”流毒中国，且有愈演愈烈之势。上至著名大网站，下至偏远地区的小学生，传播着“冥冥之中自有星定”的西洋迷信思想。“哪个星座女生最容易嫁给有钱人”、“哪个星座最容易朋友变情人”、“十二星座凶吉配对表”之类的蛊惑之词赫然出现在网页标题中。一种说法是，人出生的时候太阳正在哪一个星座里运行，该人就属于这个星座。这个人的一生祸福，他的性格、能力、财富、情感等就和这个星座有关。还有一种说法是，占星术各星座只是宇宙方位的代名词，从春分点开始，每 30°一个方位，共 12 个方位，沿用以白羊座打头的 12 个名称，只具有虚拟的意象，而不是天上真实的星座。照前一种说法，每个人的星座应以表 3.5.1 为准，而网站上宣扬的星座名与日期已经完全错乱（见表 3.5.2）；照后一种说法“星座算命”的规则已经与星座无关。所谓某人属于某一个星座，并不是天上的真实星座，更不符合“太阳在哪一个星座中运行”的真实情况。无论哪一种说法都是完全没有科学道理的。星座的名称，摩羯、巨蟹之类看似神秘，只不过是古人的想象而已。恒星虽然都是巨大的天体，但相距非常遥远，星座里的恒星，彼此之间并无任何关联，也许远近相差几百上千光年，根本不存在与其名称相对应的实体。天文学家也只能借助望远镜得到它们送来的微弱的电磁波辐射对之进行科学研究。遥远的恒星怎会影响到某个人的具体命运呢？再说，全世界 60 多亿人口，按 12 个星座平均，属于同一星座的有 5 亿人，他们的性格、命运等难道都是一样的吗？

表 3.5.2 网站上的边界星座速查表

年份	水瓶	双鱼	白羊	金牛	双子	巨蟹	狮子	处女	天秤	天蝎	射手	摩羯
1979	1.21	2.19	3.21	4.21	5.21	6.22	7.23	8.24	9.23	10.24	11.23	12.22
	0:00	14:13	13:21	0:35	23:53	7:56	18:48	1:46	23:16	8:27	5:53	19:09
1997	1.20	2.18	3.20	4.20	5.21	6.21	7.23	8.23	9.23	10.23	11.22	12.22
	8:42	22:51	21:54	9:02	8:17	16:20	3:15	10:19	7:55	17:14	14:47	4:06
1999	1.20	2.19	3.21	4.20	5.21	6.22	7.23	8.23	9.23	10.24	11.23	12.22
	20:37	10:46	9:45	20:46	19:52	3:49	14:43	21:51	19:31	4:52	2:24	15:43

可能令这些骗术传播者们始料不及的是，他们宣扬的星座计算结果竟然是我们中国传统的廿四节气中的 12 个中气时刻！星座网站上的“边界星座速查表”（表 3.5.2）声称：“如果你的生日在两个星座的交界处，不清楚自己到底是什么星座，可以在这里查找太阳进入每个星座的具体时间。”以其中 3 个年份为例，对照中国科学院紫金山天文台出版的《1979 年中国天文年历》、台北市立天文科学教育馆出版的《1979 年天文年鉴》和北京《天文爱好者》杂志社出版的《1999 年天文普及年历》（这是随意抽取的 3 份资料），列出这 3 个年份中的 12 个中气时刻（表 3.5.3），立即发现：除个别尾数由于进位的原因有所不同以外，竟是一模一样的。星座算命毋宁说是中国的“中气算命”或“节气算命”。天文年历中的节气时刻已经化算到东经 120°标准时间，即北京时间，因为节气是中国特色的；但“星座算命”却是洋玩意儿，而星座网站上的“速查表”也已化算到北京时间，看来已经过改装，不是地道的“原装货”。早在 200 多年前，法国思想家伏尔泰（Voltaire）就曾经说过：“迷信就是傻子遇到了骗子的结果。”我们不仅不要做傻子，更要拿起科学的武器，识别“星座算命”似是而非的真面目，揭穿骗子们玩弄的把戏，崇尚科学，破除迷信。

表 3.5.3 天文年历中的二十四节气时刻表

年份	大寒	雨水	春分	谷雨	小满	夏至	大暑	处暑	秋分	霜降	小雪	冬至
1979	1.21	2.19	3.21	4.21	5.21	6.22	7.23	8.24	9.23	10.24	11.23	12.22
	0:00	14:13	13:22	0:35	23:54	7:56	18:49	1:47	23:17	8:28	5:54	19:10
1997	1.20	2.18	3.20	4.20	5.21	6.21	7.23	8.23	9.23	10.23	11.22	12.22
	8:43	22:52	21:55	9:03	8:18	16:20	3:16	10:19	7:56	17:15	14:48	4:08
1999	1.20	2.19	3.21	4.20	5.21	6.22	7.23	8.23	9.23	10.24	11.23	12.22
	20:37	10:47	9:46	20:46	19:52	3:49	14:44	21:51	19:32	4:52	2:25	15:44

3.6 现代时间服务工作

3.6.1 时间计量的现代概念

20 世纪 60 年代以前，平太阳秒一直是时间计量的基本单位，它的基准是地

球自转周期。地球自转被当做绝对稳定可靠的标准钟来使用。20世纪60年代，天体测量学发现了地球自转周期并不稳定，或者说地球自转速度是不均匀的。它有三种变化：①受大气环流等周年周期因素的影响，日长的变化以年为周期，变幅±$0^s.02$，北半球春季变长，秋季变短；②受潮汐摩擦等长期因素影响，日长有长期变化，每100年减慢$0^s.001$～$0^s.002$；③其他各种因素造成的不规则变化。地球钟的稳定度是0.7×10^{-9}，即1秒钟可能有十亿分之一秒的误差。做为时间计量基准，地球钟不再可靠。至20世纪70年代，人工制造的原子钟的稳定度达到10^{-13}，比地球自转准确度高1万倍。1967年10月，第13届国际计量大会决议使用新的时间计量基准：以在海平面上铯原子^{133}Cs基态能级跃迁辐射的电磁波振荡9 192 631 770周所经历的时间为1秒。1972年1月1日世界时0时启用，并追溯到1958年1月1日世界时0时。以原子为基准的时间称为原子时。原子时靠全世界100多台原子钟加以维持（至2006年12月已发展至58个实验室，共240台原子钟）经国际时间局统一进行数据处理，由各授时单位向全世界发布，称为国际原子时（TAI）。

3.6.2 国际时间服务

由国际时间局主持的为全世界提供标准时间，包括标准频率的工作称为国际时间服务。国际时间局成立于1911年，1919年开始由国际天文学联合会（IAU）主持，设在法国，由巴黎天文台台长担任当然的局长。1965年以后由国际天文学联合会、国际大地测量学及地球物理学联合会、国际无线电科学协会、国际无线电通讯咨询委员会、国际计量委员会等五大国际机构联合指导。

空间科学研究，人造卫星和导弹的发射、跟踪和飞行控制，大容量数据通信，远距离无线电导航，精密大地测量，天文地球动力学研究等，都需要高精度的时间和标准频率，包括作为时间单位基准的国际原子时和以地球自转为依据的世界时。世界时虽然已失去基准的作用，但它是对地球自转的真实描述，是研究地球自转理论的基本数据之一，仍具有很重要的意义。

原子时服务工作包括分散在世界各地的原子钟之间的相互比对，经综合处理获得标准国际原子时，用无线电技术以时号方式向全世界发播。世界时服务工作包括各天文台用天文方法测时，按世界时的近似外推值通过无线电时号对外发播，然后再根据精确的测时结果对已发播的时号进行改正，改正数据一般延后两三个月在《授时公报》中刊布。世界时测时精度目前为$0^s.001$水平。发播时号和标准频率所用的无线电波段从高频、甚低频，发展到所有可用的无线电频谱；传递信号的机构，从专门的授时台发展到远距离无线电导航台、电视台、通信卫星、导航卫星及微波中继网等。

中国开展时间服务工作的单位有中国科学院上海天文台和陕西天文台，它们

同时也是国际时间服务的成员单位。陕西天文台（现名中国科学院国家授时中心）从 1980 年开始每天 24 小时向全世界发播时号，呼号为 BPM 和 BPL。BPM 为短波时号，频率 2.5、5、10、15 兆赫，精度 1 毫秒；BPL 为长波时号，精度为 1 微秒（地波精度）和 10 微秒（天波精度）。

3.6.3 协调世界时

近代科学技术对于时间计量的要求，包括两个方面的内容：时刻和时间间隔。大地测量、天文导航和空间飞行器的跟踪、定位，空间飞行器的返航和回收，需要知道以地球自转为依据的世界时时刻；而精密校频与一切与时间计量有关的物理学领域，则要求以原子时秒为基准的均匀时间间隔。国际天文学联合会和国际无线电咨询委员会决定采用一种协调原子时秒长与世界时时刻的时间计量系统，称为协调世界时（coordinated universal time），代号 UTC。1975 年第 15 届国际计量大会通过决议予以确认，由大多数国家的授时单位向全世界发播。中国广播、电视和电信系统使用的标准时间就是 UTC。打开中国科学院国家授时中心的网页 http://www.ntsc.ac.cn/，即可获得我国最直接、最权威的 UTC 标准时间。

协调世界时 UTC 的秒小数是国际原子时 TAI，它以原子振荡周期为基准，是均匀稳定的；秒及秒以上的时、分是世界时 UT，它以地球自转周期为基准，是不均匀的，有时快有时慢。当 TAI 与 UT 的秒小数之差接近 1 秒时，将 UTC 的整秒数加 1 秒或减 1 秒，以保持 $|UTC-UT|<0^s.9$，这一措施称为跳秒，或闰秒。由于 UTC 与 UT 差数很小，需积累很长时间才会接近 1 秒之差，所以跳秒并不经常进行，两次跳秒之间不可能有小于半年的间隔。所以国际上规定，跳秒只选择在每年的 12 月 31 日或 6 月 30 日进行。具体程序为：

当地球钟走慢了，让 UTC 增加 1 秒（称为正跳秒或闰正秒），以迁就世界时，即

$$23^h\ 59^m\ 59^s \rightarrow 60^s \rightarrow 0^h\ 0^m\ 0^s$$

当地球钟走快了，让 UTC 减去 1 秒（称为负跳秒或闰负秒），以迁就世界时，即

$$23^h\ 59^m\ 58^s \rightarrow 0^h\ 0^m\ 0^s$$

跳秒措施由国际时间局做出决定，提前通知各授时单位，全世界统一执行。每次跳秒都记录在时间历史档案上。

协调世界时本质上是原子时，它的秒长与原子时秒长一致，时刻与原子时时刻有整秒数的差别，从时间历史档案累积的跳秒记录中，可以补回这种差别，从而得到严格准确的原子时计量序列。协调世界时的时分秒都和世界时一致，直接提供了精确到秒级的近似世界时时刻。当需要更精确的世界时序列时，可从国际

时间局或各天文台提供的天文测时资料中获得。国际计量大会决议中说："协调世界时是民用时间的基础，它的发播同时向用户提供标准频率、国际原子时和近似的世界时。"

用协调世界时计时，当发生跳秒时，日长或年长会增加或减少 1 秒。例如 2008 年 12 月 31 日夜，实施了一次正跳秒，在进入 2009 年 1 月 1 日世界时 0 时之前，全世界都多过了 1 秒。不过这时北京时间已是 1 月 1 日上午 8 时，对中国来说这一秒不是多在 2008 年，而是多在 2009 年。对西经度国家，2008 年多了 1 秒；而对东经度国家，2009 年多了 1 秒。由于当初定义原子时秒的时候，定得稍短了点，再加上地球自转长期减慢这两种原因，世界时不断落在原子时后面，累计的正跳比负跳多。原子秒比地球秒短，UTC 从 1958 年到 2009 年，由跳秒造成的原子时与世界时之差，累计已达 34 秒。UTC 担任着协调两种时间的角色，用跳秒的办法使整秒以上的时刻迁就世界时，即采取停走一步的方式等着落在后面的世界时与之同行，但它的步履速度始终和原子时保持一致。

比原子钟精度更高的天然时钟是脉冲星（详见 8.1 节），稳定度达到 10^{-19}，比原子钟高 6 个数量级。用多颗脉冲星采用合适算法构成综合脉冲星时，具有比 TAI 更高的频率稳定度，并能检测 TAI 的误差。脉冲星时间标准及其应用研究已成为时间、频率研究新的前景领域。



第4章 行星系统

给我一个支点，我能用杠杆撬起地球。

——阿基米德

那些为现代技术发展所不可缺少的理智工具，主要来自对星空的观察……像牛顿那样的有创造能力的思想家，他们的思想由于凝视这星空而展翅高飞。

——爱因斯坦，《艾萨克·牛顿》

4.1 IAU 决议：太阳系行星的定义

4.1.1 IAU 的新决议

国际天文学联合会在布拉格举行的第 26 届大会于 2006 年 8 月 24 日通过关于“太阳系行星的定义”的决议，全文如下：

IAU 决议：太阳系行星的定义

现代的观测正在改变着我们对行星系统的认识。天体的命名应当反映这些最新的知识，这一点特别适用于行星这个名词。名词“行星”源自描画“漫游者”，那时只知道它们是天空中移动的光点。最近的发现使我们能用新得到的科学信息创建新的定义。

IAU 决议把行星和太阳系中的其他天体定义为如下不同的三类：

(1) 行星（planet）是一个具有如下性质的天体：①位于围绕太阳的轨道上；②有足够大的质量来克服固体应力以达到流体静力平衡的形状（近于球形）；③已经清空了其轨道附近的区域。

注 1 八颗行星是水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星和海王星。

(2)“矮行星”（dwarf planet）是一个具有如下性质的天体：①位于围绕太阳的轨道上；②有足够大的质量来克服固体应力以达到流体静力平衡的形状（近于球形）；③还没有清空其轨道附近的区域；④不是一颗卫星。

注 2 IAU 将建立一个程序对接近“矮行星”和其他分类边界的天体进行评估。

(3) 其他所有围绕太阳运动的天体被定义成“太阳系小天体”(small solar system body)。

注 3　目前这些天体包括绝大多数的太阳系小行星(asteroid)、绝大多数的海外天体(TNO)、彗星和其他小天体。

IAU 进一步决议：根据上述的定义，冥王星(Pluto)是一颗“矮行星”，并且被认定成新一类海外天体的原型。

TNO 是 trans-neptunian object 的缩写。名词“行星”源自描画“漫游者”的含义是：planet(行星)出自古希腊文，相对于 star(恒星)而言。天空中的恒星虽然随着地球的自转和公转整体地在天球上运行，但恒星与恒星之间的相对位置以及它们排列的形状是恒定不变的。而行星则在众恒星之间穿行，即所谓天空中移动的光点。在古代，人们并不知道地球以及行星绕太阳转动的事实。

4.1.2　行星发现简史

金星、木星、水星、火星、土星五颗行星，是肉眼可以看见的，各古代民族都早已发现。1781 年，英国天文学家威廉·赫歇尔(W. Herschel)通过望远镜发现天王星。1846 年，法国的勒维叶(U. J. J. Le Verrier)和英国的亚当斯(J. Adams)分别应用牛顿力学原理，根据天王星的轨道异常“在笔尖上”发现了海王星，并经天文望远镜的观测证实。

美国天文学家洛威尔(P. Lowell)企图根据海王星的轨道异常，通过计算发现海王星轨道外面的新行星，10 多年未能成功。直到他逝世 14 年之后的 1930 年，才由年轻的汤博(C. Tombaugh)在检视大量星空照片时于偶然中发现，取名冥王星。1978 年美国海军天文台的克里斯蒂(J. Christy)发现冥王星的卫星查龙(Charon)。曾经以为冥王星的质量在水星与地球之间，直到发现冥卫，才根据开普勒定律准确计算出冥王星的质量为地球质量的 0.22%，只有水星质量的 1/25。

2005 年由哈勃望远镜发现两个可能的新冥卫，2006 年得到证实，取名为尼克斯(Nix)和休德拉(Hydra)。它们的亮度为冥王星的 1/5 000，分别在距离冥王星约 4.4 万千米和 5.3 万千米的圆形轨道上运行，直径为大约 48 千米和 165 千米，比直径 1 200 千米的查龙小得多(光盘图 4.1.1　冥王星一家四口的合影)。

根据新的行星定义，查龙究竟是冥王星的卫星还是与冥王星组成双矮行星，尚未见明确定论。按通常的理解，行星和卫星的公共质心应当在行星半径范围之内(如地球与月球)，而查龙与冥王星的公共质心不合此条件，应被称为双矮行星(光盘图 4.1.2　地月系质心和冥王星-查龙的质心)。

4.1.3 IAU大会上的讨论

国际天文学联合会2006年在布拉格举行的第26届大会最终作出冥王星不算行星的决议。8月16日，IAU下属的七人行星定义委员会向大会提交了一份早已准备好的决议草案，即所谓（9+3）方案。该方案确定太阳系共有12个行星。8大经典行星（classic planet）：水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星；3个类冥行星（pluton）：冥王星（Pluto）、查龙（Charon）和2003UB313；1个矮行星（drawf planet）：谷神星。谷神星是1801年由意大利天文学家皮亚奇（G. Piazzi）发现第一颗小行星，位于火星与木星之间，直径932千米，质量1.2×10^{21}千克（约为地球质量的1/5 000）。

（9+3）方案引起了激烈的争论。几天下来，形成三种不同的意见。一种是支持（9+3）方案，但行星的个数以后将随时加以修改。另一种是维持现状，照顾历史和传统的影响，只有九大行星，所有“新来者”都不算数。最后一种是（9－1）方案：开除冥王星，太阳系中只有八大行星。冥王星、查龙、2003UB313和谷神星都是小天体带中的成员，它们没有能力清空其轨道附近的区域，不能算作行星。

拥护（9－1）方案的学者占据优势。8月24日，大会在IAU提案委员会委员乔瑟琳·贝尔（J. Bell，即脉冲星的发现者之一，详见8.1）主持下，对决议文本分4部分（5A、5B、6A、6B）进行表决。结果5A、6A获通过，连起来就是最终的决议文本；5B、6B遭否决。5B是关于经典行星的称谓，6B是关于类冥行星的称谓。最后获得通过的方案表明：太阳系只有八大行星，冥王星是“矮行星”，矮行星不是行星（光盘图4.1.3 IAU通过关于行星的新定义）。

2006年09月13日国际小行星中心授予爱丽丝（Eris，即2003 UB313）小行星编号136199。2007年9月7日，国际小行星中心授予冥王星小行星编号134340，查龙、尼克斯和休德拉的编号为134340Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ。

4.1.4 IAU新决议的历史价值

IAU通过新决议的消息迅速传偏全世界。“冥王星被开除”，“太阳系只剩下八大行星”，“教科书将重新改写”……的报道出现在各大媒体上。

大多数天文学家认为“IAU的新决议是天文学历史上的巨大进步，人类认识太阳系的新的里程碑，解决了历史遗留问题。对行星定义的明确和统一的认识，将对历史和文化产生巨大的影响。

“冥王星毕竟已经占据行星宝座70多年，现在要把它拉下马也不容易。把冥王星逐出行星行列，不仅要改写所有的教科书，改写计算机软件，还要改变人们头脑里的九大行星观念。在天文科普工作中广为宣传，对天文学及其他很多领域

都会产生重大影响。”

但也有学者指出：“科学的本质不在于命名和分类，而在于理解天体如何运动，怎样形成？怎样演化？由什么物质构成？新定义的通过不会改变关于这些天体的已有的理论和观测结果。它所产生的新闻效应比科学意义更强烈。”

4.2　万有引力定律和行星运动方程

4.2.1　万有引力定律

万有引力定律是牛顿于 1687 年发表的。这一定律的最大贡献是把天体的运行规律和地面物体的运动规律统一起来了。所谓万有，其实就是“天”、“地”没有差别。无论是天体还是地面上的物体都遵从共同的力学规律。在此之前，以亚里士多德（Aristotle）为代表的思想体系认为，月亮以上的“天界”是与地面截然不同的两个世界，物质本性不同，运动规律也完全不同。这一思想体系长期成为宗教统治的工具，延绵近 2 000 年。

关于牛顿发现万有引力定律是否与看到苹果落地有关，据牛顿晚年的密友斯多克雷（W. Stukeley）的回忆录记载，牛顿在 1726 年 4 月 15 日亲口告诉他，确曾见到树上的苹果落地而引起深思，引力的概念才进入他的脑海。

万有引力定律的数学表达式非常简洁、和谐而优美

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

任何两个相距为 r 并具有质量 m_1 及 m_2 的质点之间必然存在相互吸引的力 F。式中 G 称为万有引力常数，其数值由所选定的单位制确定。在国际单位制（SI）中，G=6.674 28（67）$\times 10^{-11}$ 米^3/(千克·秒^2)，括号中的数字是最后两位数的标准误差。在天文学中，取天文单位、太阳质量和 86 400 秒为长度、质量和时间的单位，则 $G=k^2$，k=0.017 202 098 95，在天文学的天文常数系统中视做不变的“定义常数”，名为高斯常量。

无独有偶，牛顿之后一百年，法国物理学家库仑（C. A. Coulomb）发现静电力的定律：

$$f = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$$

任何两个相距为 r 并具有电量 q_1 及 q_2 的点电荷之间必然存在相互吸引或相互排斥的力 f，称为静电力。静电力定律的数学形式与万有引力定律何其相似！与引力不同的是电荷有“性”的差别：同性之间互相排斥，异性之间互相吸引。引力存在于宇宙中任何两个物体之间，不论它们具有何种物理、化学性质，是否带电，是在运动中还是静止着，是地球上的生物体还是遥远的宇宙深处的奇异物

质，抑或是原子内部的基本粒子，也不论它们之间还隔着别的什么物体或处在完全的真空中，这种力是始终存在的。

两个人之间也有引力，但微弱到觉察不出来。或许会问，如果两个人靠得很近，$r\to 0$，岂不 $F\to\infty$吗？请不要忘记，公式只对两个质点才是严格成立的。人不是质点，即使看成质点，要两个人的质心之间距离等于 0，这是不可能的。具有严格质点意义的物体，在客观宇宙中或许是不存在的。幸好力学理论证明：具有密度分层均匀的同心球层结构的正球体——各向同性的正球体——与质量集中于球心的一个具有严格意义的质点等价。各种实际的天体（致密的恒星、行星等）近似于各向同性，所以在足够精确的程度上，可以把天体当作质点看待，从而符合万有引力定律的条件。万有引力定律是牛顿及其前人开普勒、伽利略等从事天文学、力学和数学研究，特别是关于行星运动的观察与研究总结出来的成果。它奠定了经典力学体系坚实的基础，是人类科学发展史中极其光辉的一页。

4.2.2 二体问题的微分方程

二体问题是假设只有两个天体（不考虑其他天体的干扰），在万有引力作用下如何运动的问题。设只有太阳⊙和某一个行星 P，建立任一空间坐标系 O-xyz（图 4.2.1），$\boldsymbol{r}_{\odot}$是太阳的位置向量，$\boldsymbol{r}_P$ 是行星的位置向量。$\boldsymbol{r}$ 是行星相对于太阳的位置向量。以 M 和 m 表示太阳和行星的质量。太阳受到行星的引力

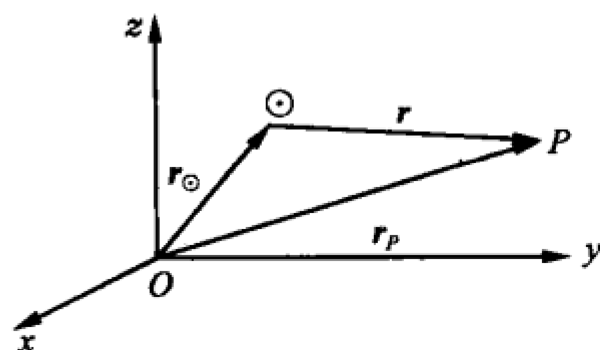


图 4.2.1 二体问题

$$\boldsymbol{F}_{\odot} = k^2 \frac{Mm}{r^2}\frac{\boldsymbol{r}}{|\boldsymbol{r}|} = k^2 \frac{Mm}{r^3}\boldsymbol{r}$$

同时行星也受到太阳的引力

$$\boldsymbol{F}_P = k^2 \frac{Mm}{r^2}\frac{-\boldsymbol{r}}{|\boldsymbol{r}|} = -k^2 \frac{Mm}{r^3}\boldsymbol{r}$$

由牛顿第二定律：太阳和行星都在力的作用下产生运动

$$\boldsymbol{F} = \frac{\mathrm{d}(m\boldsymbol{v})}{\mathrm{d}t} = m\frac{\mathrm{d}^2\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t^2}$$

应当有

$$\boldsymbol{F}_{\odot} = M\frac{\mathrm{d}^2\boldsymbol{r}_{\odot}}{\mathrm{d}t^2} = k^2\frac{Mm}{r^3}\boldsymbol{r}$$

$$\boldsymbol{F}_P = m\frac{\mathrm{d}^2\boldsymbol{r}_P}{\mathrm{d}t^2} = -k^2\frac{Mm}{r^3}\boldsymbol{r}$$

因为 $\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}_P-\boldsymbol{r}_{\odot}$，所以有

$$\frac{\mathrm{d}^2\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t^2} = \frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}t^2}(\boldsymbol{r}_P-\boldsymbol{r}_{\odot}) = -k^2\frac{M+m}{r^3}\boldsymbol{r} = -\frac{\mu}{r^3}\boldsymbol{r}$$

式中 $\mu=k^2(M+m)$。如果建立以太阳为原点的 x-y-z 直角坐标系，可获得二体问题的微分方程为

$$\begin{cases} \dfrac{d^2 x}{dt^2} = -\dfrac{\mu}{r^3} x \\ \dfrac{d^2 y}{dt^2} = -\dfrac{\mu}{r^3} y \\ \dfrac{d^2 z}{dt^2} = -\dfrac{\mu}{r^3} z \end{cases}$$

其中 $r=\sqrt{x^2+y^2+z^2}$。这是一组联立的二阶非线性常微分方程。它的通解是包含 6 个相互独立的积分常数的 6 个积分。当积分常数取一组定值的时候，就构成某一行星运动方程的特解。用数学方法可以求出通解和特解。解的结果表明，行星运动是沿着圆锥曲线的平面运动，太阳位于一个焦点上。6 个积分常数决定了轨道的空间位置和某一时刻行星在轨道上的位置，在天文学中称为 6 个轨道根数。二体问题的微分方程及其积分，完满地解释了开普勒行星运动定律的动力学原因，彻底地解决了只有两个天体时全部的运动学问题。

需要注意的是，二体问题的上述解只是全部二体问题解的一半，因为它只回答了行星如何绕太阳运动的问题，即行星以太阳为参考坐标原点的运动问题。另一半是太阳相对于恒星参考系的运动（或太阳相对于太阳与行星公共质心的运动）。当然也可以从类似的微分方程求解，这里未作叙述而已。通常所说的行星沿椭圆轨道绕太阳运动，严格地说，只是行星在恒星际空间中运动的一部分，全部的实际运动要比椭圆运动复杂一些，但是余下的那一部分运动相对很小，通常可以忽略不计。

4.2.3　开普勒行星运动定律

开普勒行星运动定律是万有引力定律的必然结果，但其发表却领先万有引力定律 80 年。开普勒是德国人，生于 1571 年 12 月 27 日，卒于 1630 年 11 月 15 日，几乎是毕生呕心沥血从事行星运动的研究，于 1609 年发表第一、第二定律，1619 年发表第三定律。开普勒纠正了哥白尼认为行星在以太阳为中心的圆轨道上匀速运动的错误，精确地描述了行星运动的轨道及行星在轨道上运动的规律。开普勒对天文学作出了卓越的贡献，然而他的一生却是在极端艰难困苦的条件下度过的，终因贫病交加而离开了人世。

开普勒三大定律的内容是：

(1) 行星运动的轨道是椭圆，太阳位于椭圆的一个焦点上。

(2) 以太阳为坐标原点的行星向径在相等的时间内扫过相等的面积。

(3) 不同行星在其轨道上公转周期 T 的平方与轨道半长径 a 的立方成正比，即

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}$$

或者

$$\frac{a_1^3}{T_1^2} = \frac{a_2^3}{T_2^2} = \cdots = \frac{a_i^3}{T_i^2} = \frac{GM}{4\pi^2} = \text{常数}$$

开普勒第一、第二定律是严格正确的。第三定律有一点小小的偏差，就是它忽略了不同行星之间的质量差别。严格的第三定律应为

$$\frac{T_1^2}{T_2^2}=\frac{a_1^3}{a_2^3}\cdot\frac{M+m_2}{M+m_1}$$

或者，对于太阳系所有的行星

$$\frac{a^3}{T^2(M+m)}=\frac{G}{4\pi^2}=\text{常数}$$

式中，M 和 m 分别是太阳和行星的质量。

由第二定律知道，行星在轨道上运动的速度是不均匀的；在近日点附近要比在远日点附近运动得快。由第三定律知道，行星离太阳越远，公转周期越长；轨道半长轴与周期之间有确切的数量关系。根据第三定律，不仅离太阳越远的行星，公转角速度越小，而且公转线速度也随到太阳的距离变远而减小。地球绕太阳公转的线速度是 29.8 千米/秒，海王星绕太阳公转的线速度只有 5.4 千米/秒。轨道线速度的计算公式（设轨道为正圆）为 $v=2\pi a/T=\sqrt{GM/a}$。依据第三定律还可以计算太阳质量和有卫星绕转的大行星的质量。因为从近似公式即可得到 $M=4\pi^2a^3/GT^2$，只要知道行星绕太阳或卫星绕行星公转的周期和轨道长半径即可。对于没有卫星绕转的行星，测定其质量要用别的方法，就不那么直接了。对于像月亮这样的卫星，由于与地球的质量比不算太小，不适合用近似公式，而用严格公式只能算出地球与月亮的质量和，也要通过别的方法才能测定出它们各自的质量。冥王星的质量在查龙没有发现以前是不确切知道的，发现查龙之后才通过开普勒定律计算出冥王星的质量为 1.290×10^{22} 千克，相当于 0.002 16 个地球。

4.2.4 多体问题与摄动方法简介

两个天体在万有引力作用下如何运动的二体问题，已获得十分精确而完满的解答。但是，实际天体不止两个，只要再多出 1 个天体，即三体问题，求解就非常困难了。对于空间直角坐标系，n 个天体在相互之间存在的万有引力作用下，可以列出 $3n$ 个二阶微分方程组，其通解应由 $6n$ 个积分组成，共包含 $6n$ 个积分常数。其中有 10 个积分总是可以得出的，这 10 个积分是：n 个天体的质量中心运动定律，有 3 个积分（如果没有其他外力，n 个天体的质量中心只能做匀速直线运动）；n 个天体的总动量守恒定律，有 3 个积分；n 个天体的总动量矩守恒定律，有 3 个积分；n 个天体的总能量守恒定律有 1 个积分，一共 10 个积分，在天体力学中称为 10 个初积分。如果再找出其余 $6n-10$ 个积分，n 体问题就能彻底解决了。1843 年，雅可比（C. H. Jacobi）证明：如果包括 10 个初积分在内的

$6n-2$ 个积分都已找到，则最后两个积分就一定能找到。二体问题应有 12 个积分，前面讨论的包含 6 个轨道根数的 6 个积分，是二体问题中一个天体（行星）相对于另一个天体（太阳）的运动积分；用同样的方法还可以求出另一个天体自身的 6 个运动积分，一共 12 个积分。除 10 个初积分以外，刚好剩下两个积分，按雅可比定理，二体问题是应当能够彻底解决的。

三体问题的微分方程并不十分复杂。设有 1，2，3 三个天体，它们的质量为 m_1，m_2，m_3；r_{12}，r_{23}，r_{13}分别表示它们相互之间的距离。在空间直角坐标系中，用 q_{1i}，q_{2i}，q_{3i}（$i=1,2,3$）表示三个天体对应于 x 轴（$i=1$），y 轴（$i=2$），z 轴（$i=3$）的三组坐标。用建立二体问题微分方程同样的方法，可以列出三体问题的微分方程如下：

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}^2 q_{1i}}{\mathrm{d}t^2}=k^2 m_2\dfrac{q_{2i}-q_{1i}}{r_{12}^3}+k^2 m_3\dfrac{q_{3i}-q_{1i}}{r_{13}^3}\\ \dfrac{\mathrm{d}^2 q_{2i}}{\mathrm{d}t^2}=k^2 m_1\dfrac{q_{1i}-q_{2i}}{r_{12}^3}+k^2 m_3\dfrac{q_{3i}-q_{2i}}{r_{23}^3}\\ \dfrac{\mathrm{d}^2 q_{3i}}{\mathrm{d}t^2}=k^2 m_1\dfrac{q_{1i}-q_{3i}}{r_{13}^3}+k^2 m_2\dfrac{q_{2i}-q_{3i}}{r_{23}^3}\\ i=1,2,3\end{cases}$$

这是 3 组共 9 个联立的二阶非线性常微分方程。它们的通解是包含 18 个相互独立的积分常数的 18 个积分。除 10 个初积分外，还剩 8 个积分。按雅可比定理，只要找出其中的 6 个积分，三体问题就彻底解决了。不幸的是，直到现在一个也没有找到。近 300 年来，很多著名数学家和力学家研究这一难题，有关文献超过 1 000 篇，求解的问题至今仍为悬案。

1900 年在国际数学家大会上，顶尖级的德国数学大师希尔伯特（D. Hilbert）提出了即将带入新世纪的 23 个数学难题，称为希尔伯特问题。在同一篇演说中，希尔伯特还举出了另外两个难题：第一个是费马大定理，即代数方程 $x^n+y^n=z^n$，在 $n>2$ 时，没有正整数解；另一个就是三体问题。此后 100 年的历史表明，这两个问题对于 20 世纪数学的整体发展，超过了任何一个希尔伯特问题所起的作用。因为在人们试图解决问题的过程中，产生了一系列全新的数学思想和方法。例如，大数学家庞加莱在求证三体问题的过程中发现了 20 世纪 80 年代在数学、物理学和天文学领域大放异彩的混沌（chaos）理论的源头。费马大定理终于在 1994 年被美国普林斯顿大学的怀尔斯（A. Wiles）彻底解决了，他被破例授予了菲尔兹特别贡献奖（这项数学领域的最高荣誉规定只授予 40 岁以下的年轻人，而 1998 年怀尔斯获奖时已经 45 岁了）。350 年未解的难题得到解决，当然是好事，怀尔斯也将因此而名垂青史，但也有人遗憾地感叹："一只会生金蛋的母鸡被杀死了。"另一只会生金蛋的母鸡——三体问题至今还没有人能真正抓住它。在希尔伯特发表演说之前，19 世纪末，庞加莱等已证明：找到三体问题的全部代数函数形式的解是不可能的。于是数学家和力学家们转而寻找级数形式的解。1912 年芬兰数学家松德曼（K. F. Sundman）找到了附加限制条件的幂级数解。遗憾的是这些级数收敛得非常慢，以至于没有实用价值。例如，要获得三

体问题的一个位置数据，级数至少要取 $10^{80\,000}$项，才能达到一般的精度，而按爱丁顿的计算，整个宇宙中的质子加中子数也不超过 10^{80}。求三体问题的通解陷入困境，虽然出路没有完全被堵死，但到达通解的前途还看不到任何光明。人们期望于对一些特殊的三体问题求解。讨论得最多的是一种比较简单的类型：平面圆形限制性三体问题，即在二体问题的圆轨道平面上再增加一个无限小质量体。即使对如此简化的问题，大数学家拉格朗日当年也只得到了 5 个特解，一般性的通解至今还是没有得到解决。实际的天体系统远不止 3 个天体。有 n 个天体的动力学问题称为 n 体问题，其解决的难度也就可想而知了。

天体力学虽然不能从理论上精确地圆满解决实际天体的动力学问题，但为了计算行星轨道和预知天体的位置，人们改弦易辙，探求有效的近似求解的方法，提出了摄动理论。摄动是指在二体问题中天体沿轨道运动时，因受到其他天体的影响而偏离原来轨道的运动。欧拉、拉格朗日、高斯、泊松（S. D. Poisson)、拉普拉斯等数学名家都对摄动理论作出过贡献。许多实际问题通过摄动理论和方法得到了解决。摄动方法又分为分析方法和数值计算方法两类。现代高速电子计算器用于摄动方法研究，使理论成果更加丰富，解决实际问题的能力和速度也大大提高。现代摄动方法已越出了天体力学的研究范围，进入理论物理和工程技术等领域，得到广泛应用，在某些学科中被称为微扰理论。

4.2.5 拉格朗日平动点

所谓平面圆形限制性三体问题中的无限小质量体，是指其质量小到对两个大天体的运动不产生影响，而且两个大天体只做圆周运动。设两个大天体的质量和为 1，其中较小的一个 P_2 质量为 μ，另一个 P_1 质量为 $1-\mu$，而 $\mu<0.5$。对有如此限制的三体问题，拉格朗日找到了 5 个特解，即位于 5 个特殊位置上的无限小质量体的运动规律。这 5 个特殊位置被称为拉格朗日平动点：L_1，L_2，L_3，L_4，L_5。位于这 5 个点上的任一质量甚小的天体，将在大天体和小天体引力的联合作用下，保持着与大、小天体相对固定的位置关系，随大、小天体一起整体地绕大小天体的公共质心做圆轨道运动。

在图 4.2.2 的平面直角坐标系中：P_1、P_2 分别是大小天体的质心，坐标原点位于 P_1、P_2 的公共质心上，以 P_1、P_2 的连线为 X 轴，P_1、P_2 之间的距离为长度单位，因为 P_2 和 P_1 整体地绕公共质心做圆周运动，所以这一段距离是不变的。5 个拉格朗日平动点的坐标位置可按以下公式来计算：

$$X_{P_1}=-\mu,\quad Y_{P_1}=0$$

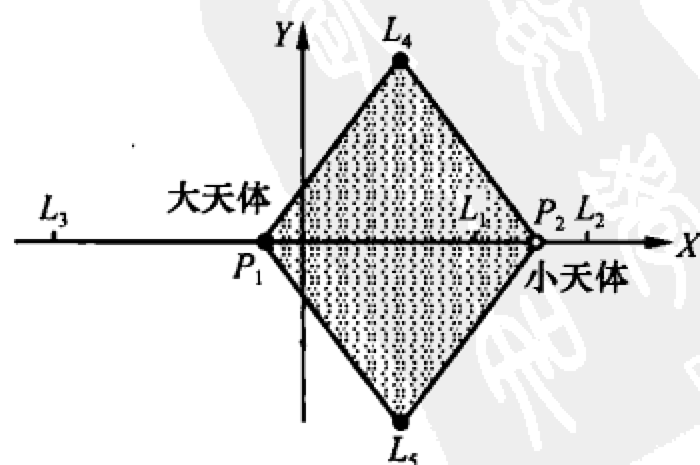


图 4.2.2　5 个拉格朗日平动点

$$X_{P_2}=1-\mu,\quad Y_{P_2}=0$$

$$X_1=(1-\mu)-\left(\frac{\mu}{3}\right)^{1/3}+\frac{1}{3}\left(\frac{\mu}{3}\right)^{2/3}+\frac{1}{3^2}\left(\frac{\mu}{3}\right)^{3/3}-\frac{1}{3^3}\left(\frac{\mu}{3}\right)^{4/3}+\frac{1}{3^4}\left(\frac{\mu}{3}\right)^{5/3}+\cdots\cdots$$

$$Y_1=0$$

$$X_2=(1-\mu)+\left(\frac{\mu}{3}\right)^{1/3}+\frac{1}{3}\left(\frac{\mu}{3}\right)^{2/3}-\frac{1}{3^2}\left(\frac{\mu}{3}\right)^{3/3}+\frac{1}{3^3}\left(\frac{\mu}{3}\right)^{4/3}+\frac{1}{3^4}\left(\frac{\mu}{3}\right)^{5/3}-\cdots\cdots,$$

$$Y_2=0$$

$$X_3=-1-\frac{5}{12}\mu+\frac{23\times7^2}{12^4}\mu^3+\cdots,$$

$$Y_3=0$$

$$X_4=\frac{1}{2}-\mu,\quad Y_4=\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$X_5=\frac{1}{2}-\mu,\quad Y_5=-\frac{\sqrt{3}}{2}$$

L_1，L_2，L_3 位于大天体与小天体质心的连线上。L_1 在大天体与小天体之间，L_2 在小天体外侧，L_3 在大天体外侧。L_4，L_5 分别位于与大天体和小天体成等边三角形的两个对称点上。注意：上式中 X_1，X_2，X_3 的计算，要求 $\mu<0.5$，即 μ 甚小，或大小天体的质量相差比较悬殊，否则级数收敛太慢，需考虑其他更加复杂的计算方法。

如果 P_1 是太阳，P_2 是地球，根据 1976 年 IAU 天文常数系统取值，太阳质量/地球质量=332 946.0，天文单位=149 597 870 千米，则不难计算

$$\mu=3.003\times10^{-6}$$
$$X_1=0.990\,027$$
$$X_2=1.010\,034$$
$$X_3=-1.000\,001\,251$$
$$X_{P_1}=-0.000\,003\,003$$
$$X_{P_2}=0.999\,996\,997$$

L_1 点距离地球 0.009 970 天文单位=149.149 万千米

L_2 点距离地球 0.010 037 天文单位=150.151 万千米

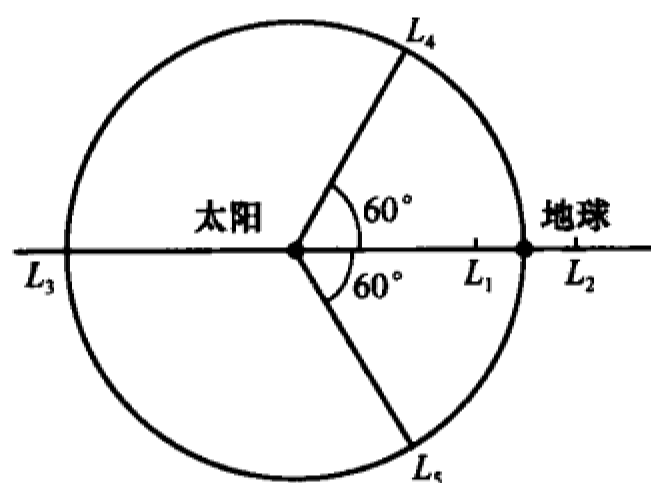


图 4.2.3　地球和太阳的 5 个拉格朗日平动点

L_3 点距离太阳 0.999 998 248 天文单位，太阳质心距离坐标原点只有 449 千米，可以忽略不计；地球质心距离坐标原点为 1 天文单位−449 千米，其与天文单位的差别也可以忽略不计。

如果以太阳为中心，以天文单位为半径作圆，则地球 L_3、L_4、L_5 点都在圆周上，L_1 在地球向太阳一侧，距地心 149.15 万千米，L_2 在地球背太阳一侧，距地心 150.15 万千米（图 4.2.3）。

1995 年欧洲和美国联合发射的“太阳和

太阳风层探测器”（the solar and heliospheric observatory）（简称 SOHO 卫星）位于 L_1 点上，24 小时不间断地监测太阳的活动，成为获取太阳信息最丰富的探测卫星。2001 年美国发射的“宇宙微波辐射各向异性探测器”（WMAP）位于 L_2 点上（光盘图 4.2.4　放置在 L_2 点上的 WMAP）。它们保持着与地球、太阳相对固定的位置关系，与地球一起绕太阳公转，周期一个恒星年。控制 WMAP 的自转与公转取同一周期，它便总是以一面对着地球与太阳方向。在这一方向上放置一面巨大的纯金制造的遮光罩，避免阳光和地球散射的红外线对仪器产生影响（光盘图 4.2.5　WMAP 进入 L_2 点的轨道路线图）。

WMAP 拍摄到宇宙 37.9 万岁时的一批照片，获得了关于哈勃常数的新值、宇宙年龄和宇宙物质分布等最新探测成果，被美国《科学》周刊评选为 2003 年全球十大科技成果之首（详见 12.8 节）。美国近期规划中投资 10 亿美元的最大一项天文探测设备是新一代空间望远镜 NGST（2002 年美国 NASA 决定，为了纪念阿波罗计划的领导人 J. E. Webb，将 NGST 命名为詹姆斯韦伯空间望远镜 JWST），也将发射到 L_2 点上。计划于 2011 年发射的欧洲空间局天体测量卫星 GAIA（详见 7.5 节），投资 4.5 亿欧元，也将发射到 L_2 点上。所有发射到拉格朗日点上的探测器，其实已经不是卫星，而是绕太阳运动的人造小行星。这些设备的建成和发射，必将开创人类认识宇宙的新纪元，迎来人类探索宇宙的第二次飞跃。

4.2.6　摄动力、潮汐现象和洛希极限

在二体问题中，一个天体相对于另一个天体（中心天体）按开普勒定律做轨道运动。现在考虑第三个天体所产生的摄动作用。这第三个天体（摄动天体）对作轨道运动的天体施加的力称为摄动力。

在图 4.2.6 中，M 是中心天体，m 是做轨道运动的天体，m' 是摄动天体，M、m、m' 也分别表示它们的质量。r 和 r' 分别表示 m 和 m' 到 M 的距离，p 表示 m' 到 m 的距离。根据万有引力，M 对 m 的力产生 m 的运动加速度 $g_0=k^2M/r^2$，同时 m 也使 M 产生运动加速度 $g_1=k^2m/r^2$，这两个加速度方向相反。但若考虑 m 相对于 M 的加速度，则应当是这两个加速度的叠加

$$g=g_0+g_1=\frac{k^2(M+m)}{r^2}$$

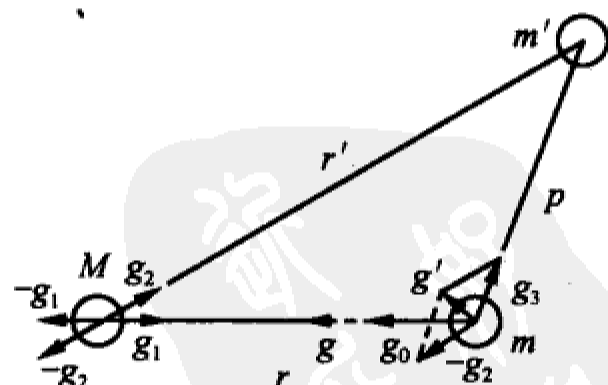


图 4.2.6　摄动力

这正是二体问题中 m 相对于 M 做轨道运动的原因。g 称为运动天体对中心天体的向心加速度。

m' 的存在使 M 产生加速度 $g_2=k^2m'/r'^2$，同时也使 m 产生加速度 $g_3=k^2m'/p^2$，两者通常不在一个方向上。g_2 的作用相当于使 m 产生了相对于 M 的加速度 $-g_2$，于是 m' 的存在，造成了 m 相对于 M 有两个加速度叠加的效果，即 g_3 与 $-g_2$ 的合成加速度 g'。g' 是两种运动

加速度的向量差，其中一个是摄动天体对运动天体产生的加速度 g_3，另一个是摄动天体使中心天体产生的加速度 g_2，前者减去后者（向量差）。这个向量差当然也是一个向量，它的方向与三个天体的质量和相对位置有关。与这一向量 g' 相应的作用力就是摄动力。

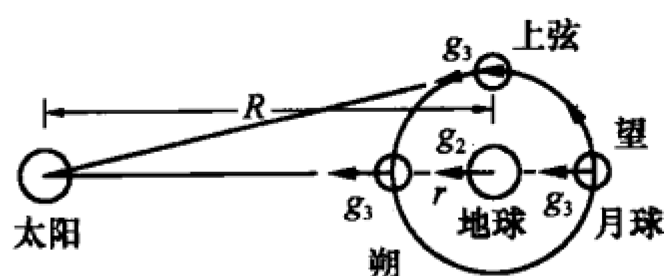


图 4.2.7　太阳对月球运动的摄动

以太阳、地球、月球三个天体为例。在图 4.2.7 中，地球是中心天体，月球是绕地球做轨道运动的天体，而太阳是摄动天体。r 和 R 分别为月球和太阳到地球的距离。月球轨道运动的向心加速度为 $g=k^2(m_{地}+m_{月})/r^2$。太阳作为摄动天体，它对月球轨道运动产生的摄动加速度 g' 是 g_3 与 g_2 的向量之差，其中 g_3 是太阳使月球产生的重力加速度；g_2 是太阳使地球产生的重力加速度。一般情况下，这两个加速度不在同一方向，不能简单相减，只有在朔和望时，可以简单加以计算。在朔时，有

$$g_3=\frac{k^2M}{(R-r)^2},\quad g_2=\frac{k^2M}{R^2}$$

式中，M 是太阳质量。

$$g'=g_3-g_2=\frac{k^2M(2Rr-r^2)}{R^2(R-r)^2}$$

因 r 比起 R 来相当小，所以省略掉 $(R-r)^2$ 项中的 r 及 r^2，得到近似结果为

$$g'=\frac{2k^2rM}{R^3}$$

太阳的摄动影响，使月球偏向太阳的方面，也就是使月球离地球远一些。在望时，有

$$g_3=\frac{k^2M}{(R+r)^2},\quad g_2=\frac{k^2M}{R^2}$$

同样可以计算

$$g'=g_3-g_2=-\frac{2k^2rM}{R^3}$$

负号表示太阳的摄动影响使月球偏向太阳的反方向，同样是使月球离地球远一些。摄动力的大小与摄动天体的质量成正比，与其距离的立方成反比。在上弦和下弦时，太阳摄动使月球离地球近一些，在此位置和其他位置，摄动力的计算因涉及方向问题而比较复杂，不再详细讨论。

值得注意的两点是：

(1) 单纯从万有引力公式计算，太阳对月球的引力比地球对月球的引力大一倍多。但由于月球绕地球公转，太阳的引力只起摄动作用，而摄动力的大小与距离的立方成反比，所以决定月球运动的主力不是来自太阳而是来自地球。

(2) 地球对月球的引力比太阳对月球的摄动力大 90 倍。尽管如此，月球受到的这一摄动力在太阳系天体中仍是相对较大的。月球绕地球公转的运动，比单纯的椭圆运动要复杂得多。精确确定月球的位置是一件非常复杂的工作，通常要考虑好几百项因素的影响。

潮汐是地球上海水涨落的现象，是太阳或月球的引力使海水相对于地球产生的运动。其计算过程类似于太阳对月球公转的摄动。在图 4.2.8 中，正对月球

(或太阳)的 A 处,海水受月球(或太阳)引力得到的加速度为 $k^2m/(D-r)^2$,其中 m 是月球(或太阳)的质量,r 是地球半径,D 是地球到月球(或太阳)的距离。地心 O 处得到的加速度为 k^2m/D^2,于是 A 相对于 O 而言的加速度为

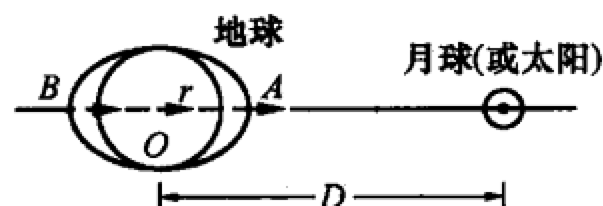


图 4.2.8 引潮力

$$k^2m\left(\frac{1}{(D-r)^2}-\frac{1}{D^2}\right)\approx k^2\frac{2rm}{D^3}$$

这一加速度使海水受到较正常海平面隆起的力,海平面涨高;同理,背向月球(或太阳)的 B 点,相对于 O 而言的加速度为

$$k^2m\left(\frac{1}{(D+r)^2}-\frac{1}{D^2}\right)\approx -k^2\frac{2rm}{D^3}$$

负号表示背着月球(或太阳)所在的方向,也同样使海水受到较正常海平面隆起的力,海平面涨高。其余各处海水对地心而言的加速度是两个方向的加速度向量之差,总的效果是使海水流向 A 点或 B 点。由于地球自转、公转和月球的运动,海洋各处轮流处于 A 或 B 的位置,造成海水有涨有落的潮汐现象。起源于月亮、太阳或其他天体的引力而造成潮汐现象的力称为引潮力(或起潮力),它等于被吸引天体某部分受到的引力与该天体中心处同样质量部分受到的引力之差(向量差),其数值与引力来源天体的质量成正比,与两天体之间的距离的立方成反比。太阳与月球相比较,虽然用万有引力公式直接计算太阳对海水的引力比月球大,比值为 180∶1,但太阳的引潮力却比月球小,比值为 1∶2.18。

在农历的一个月中,朔和望时,太阳和月亮的引潮力叠加在一个方向上,潮水涨落最大,称为大潮;上、下弦时,日、月引潮力方向相互垂直,有抵消作用,潮水涨落最小,称为小潮(图 4.2.9)。在某一具体地点,由于日、月的高

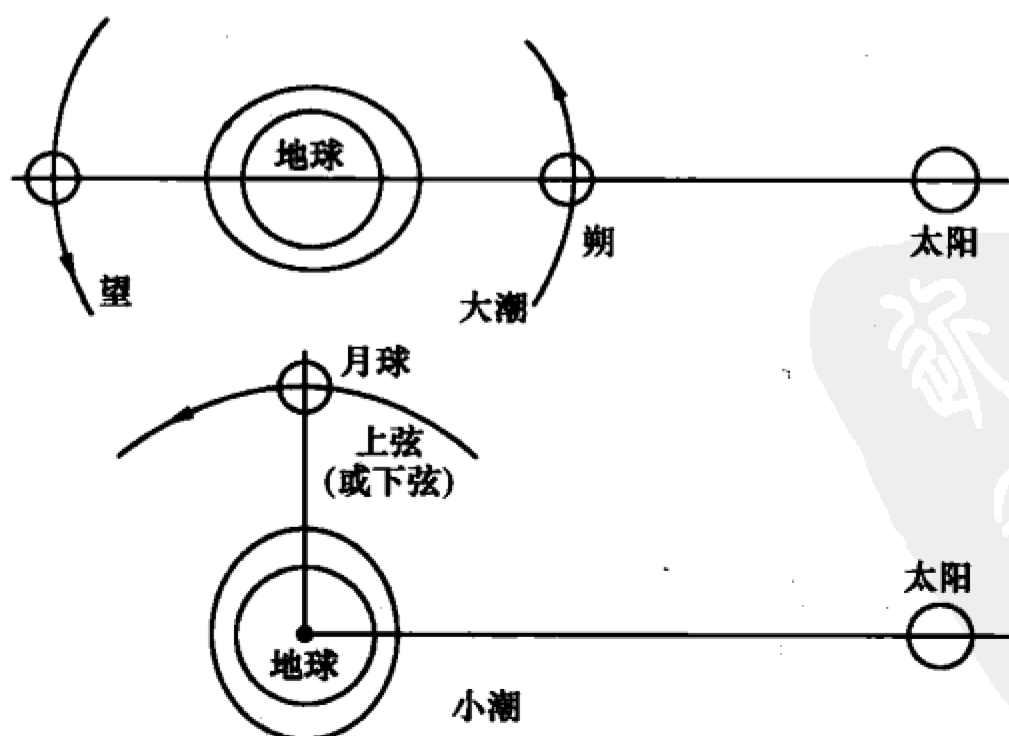


图 4.2.9 大潮与小潮

度和方位错落变化，海底及海岸地形不同以及海水流动时的摩擦作用，潮汐涨落的大小和时间规律是相当复杂的，不同地点，表现各不相同。中国的钱塘江口、加拿大的芬地湾和俄罗斯的鄂霍次克海都是著名的潮汐壮观的地方。表 4.2.1 是我国山东青岛胶南市海洋潮汐的具体时刻（来自当地民间）。

表 4.2.1　山东青岛胶南海滨潮汐表

农历日期		北京时间			
		高潮	低潮	高潮	低潮
初一	十六	05：14	11：26	17：38	23：50
初二	十七	06：02	00：38	18：26	12：14
初三	十八	06：50	01：26	19：14	13：02
初四	十九	07：38	02：14	20：02	13：50
初五	二十	08：26	03：02	20：50	14：38
初六	廿一	09：14	03：50	21：38	15：26
初七	廿二	10:02	04:38	22:26	16:14
初八	廿三	10:50	05:26	23:14	17:02
初九	廿四	00:02	06:14	11:38	17:50
初十	廿五	00:50	07:02	12:26	18:38
十一	廿六	01:38	07:50	13:14	19:26
十二	廿七	02:26	08:38	14:02	20:14
十三	廿八	03:14	09:26	14:50	21:02
十四	廿九	04:02	10:14	15:38	21:50
十五	三十	04:50	11:02	16:26	22:38

地球的大气层甚至地壳，也有潮汐涨落现象，称为气潮和固体潮，只是因为人们处于大气底层，受气潮的影响很微弱，而固体潮只有借助于专门仪器才能检测到。固体潮使地壳的涨落平均有几十厘米。

在太阳系中，除日、月之外，其他天体对地球的引潮力都非常小，原因是它们的质量小而且距离远。影响最大的金星，引潮力最大时只有月球引潮力的二万分之一。即使所有行星都排在一个方向上，引潮力统统叠加在一起，也只能使地球海水涨落 0.4 毫米。

19 世纪法国天文学家洛希（E. A. Roche）在研究卫星形状理论中，提出一个使卫星解体的极限数据，称为洛希极限。他认为，若把卫星看成相对于行星质量很小的流体团，卫星物质的内聚力只靠引力来维持，那么卫星在行星引潮力的作用下会被拉长成椭球状。当卫星与行星的距离靠得很近，引潮力达到一定程度时，会使流体团解体分散。这一极限距离即为洛希极限。其数值为 $A=2.455\,39(\sigma'/\sigma)^{1/3}R$，式中 R 为行星半径，σ 为卫星密度，σ' 为行星密度。系数 2.455 39 是假定卫星质量同行星质量之比可以忽略时洛希给出的值。如果这一比值 μ 不能忽略，系数应有所变化。根据英国天文学家达尔文（G. H. Darwin，著名生物学家 C. R. Darwin 的次子）的计算，不同 μ 对应的系数值为

μ	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0
系数	2.484	2.485	2.490	2.502	2.514

土星环中心到土星中心的距离为 2.31 个土星半径，若土星环的物质密度与土星相同，则这个距离小于洛希极限，因此土星环解体分散，不能形成一个卫星。

4.3　行星运动轨道和视运动规律

4.3.1　轨道根数

二体问题的行星运动轨道是圆锥曲线，包括椭圆（特殊情况是圆）、抛物线、双曲线三种类型。决定轨道在空间的位置和行星在轨道上的位置依赖于 6 个常数，称为轨道根数。以较为普遍的椭圆轨道（太阳系所有的行星、卫星和大部分小行星都是椭圆轨道）为例，这 6 个轨道根数是：倾角 i，升交点黄经 Ω，近日点角距 ω，半长轴 a，偏心率 e 和过近日点时刻 τ。以太阳为原点，以黄道平面为 xy 平面，春分点方向为 x 轴方向，建立空间坐标，6 个轨道根数的物理含义（图 4.3.1）为：i 是行星轨道面对黄道面的倾角，Ω 是轨道面与黄道面交线与 x 轴方向的夹角，这两个根数决定了轨道平面的空间位置。ω 是轨道长轴上近日点方向与轨道交线的夹角，它决定了椭圆长轴的方向。半长轴 a 和偏心率 e 决定了椭圆的大小和扁的程度。以上 5 个轨道根数决定了行星在空间的实际轨道。最后一个根数 τ 决定任意时刻行星在轨道上的哪一点。

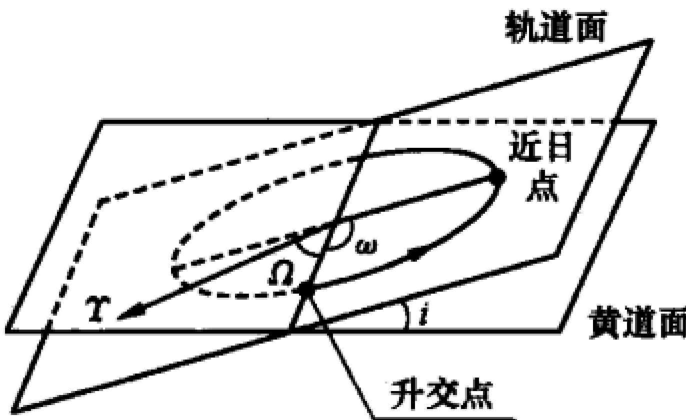


图 4.3.1　行星轨道根数

如果已知行星的 6 个轨道根数，就能够回答行星什么时候在天上什么位置的问题——天文学上称为计算星历表问题；反过来，根据对行星位置的若干次观测（理论上有 3 次就够了），可以计算出其轨道的 6 个轨道根数——天文学上称之为定轨问题。

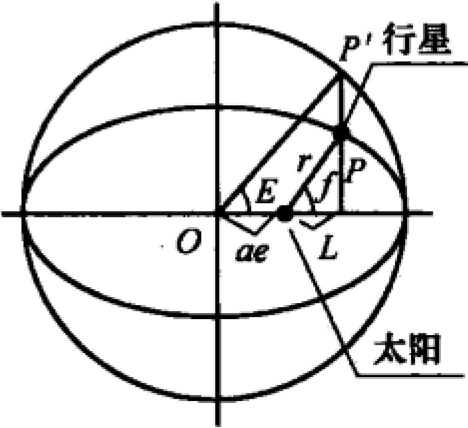


图 4.3.2　行星运动的极坐标方程

计算星历表问题是这样解决的：

由二体问题微分方程的解，可以得出椭圆轨道上行星位置的极坐标方程（图 4.3.2）

$$r=\frac{a(1-e^2)}{1+e\cos f}$$

式中，a 和 e 都是已知的轨道根数，只要知道给定时刻 t 时的极角 f，就可以计算极半径 r，从而得到行星在轨道上的位置。而轨道在空间的位置是由另几个轨道根数给定的，于是行星的空间位置当然也就可以计算了。偏偏

难题出在建立 f 与 t 的关系上。解决这一难题，还需费一些周折。

以椭圆中心 O 为中心，以半长轴 a 为半径画圆，从行星位置 P 向长轴作垂线，与圆交于 P'，垂足至太阳的距离为 L，OP' 与长轴的夹角 E 称为偏近点角。从几何关系不难看出：$\cos f=L/r$，$\cos E=(ae+L)/a$，于是有

$$r\cos f = a(\cos E - e) \tag{4.3.1}$$

代入极坐标方程可得

$$r = a(1-e\cos E) \tag{4.3.2}$$

微分方程通解中的一个积分为

$$E - e\sin E = \frac{2\pi}{T}(t-\tau)$$

式中，t 是任意时刻，τ 是6个轨道根数之一（行星过近日点时刻），T 是行星轨道运动的周期。根据开普勒第三定律，T 可以从半长轴 a 计算得到。定义 $M=\frac{2\pi}{T}(t-\tau)$。显然，当 $t=\tau$ 时，$M=0$，而且 M 是 t 的线性函数，所以 M 是从近日点起算的一个随时间均匀增加的角度，称为平近点角，于是有

$$E - e\sin E = M \tag{4.3.3}$$

此式称为开普勒方程，它是开普勒最先推导出来的。

计算星历表的过程是：由任意时刻 t 计算 M；由 M 求解开普勒方程（4.3.3）得 E；由 E 通过（4.3.2）式计算 r；再由 r 和 E 通过（4.3.1）式计算 f，问题就得到解决了。但是开普勒方程是一个超越方程，不能用一般的方法直接解出。天体力学找到一些解法，可以求得任意精度的 E 值，但过程比较繁琐，在此不加赘述了。

天体在天球上的位置最终应表达为某一天球坐标系中的一对位置参数。最常用的是赤道坐标系中的赤经 α 和赤纬 δ。从已经找到的某一时刻 t，行星在轨道平面上的极坐标位置 r、f，到最后计算出相应的 α、δ，还有一段相当复杂的过程。

1. 从 r、f 计算日心黄道直角坐标 x，y，z

建立以太阳为中心的空间直角坐标系，X 轴指向春分点，X-Y 平面在黄道平面上，Z 轴指向黄极。x，y，z 是行星在这个坐标系中的3个坐标值。当有

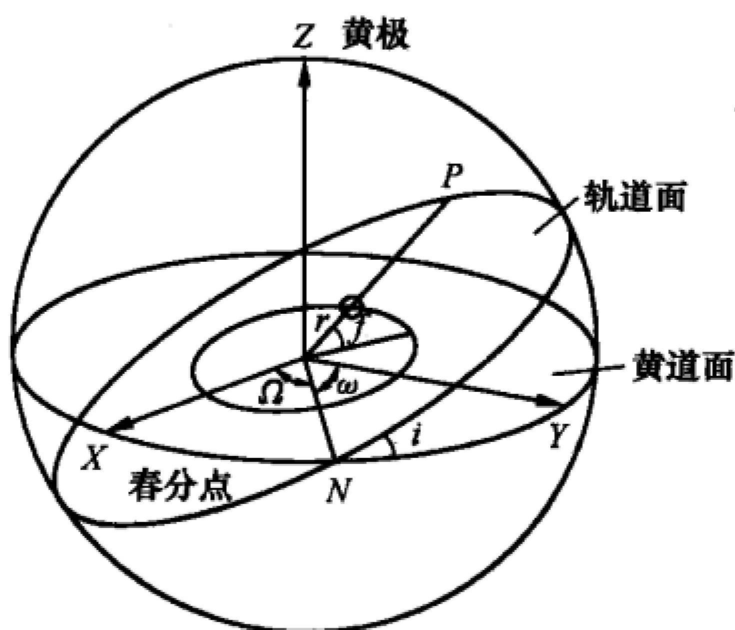


图 4.3.3 轨道根数与天球坐标

$$\begin{cases} x = r\cos\alpha \\ y = r\cos\beta \\ z = r\cos\gamma \end{cases}$$

α，β，γ 分别是向径 r 与 X、Y、Z 三条坐标轴的三个夹角。把向径 r 延伸到天球上，与天球交于 P 点，P 点一定位于轨道平面大圆上（图4.3.3）。α、β、γ 应当分别等于 P 点到位于天球上的 X、Y、Z 三点的三段大圆弧的长度：$\overset{\frown}{PX}$，$\overset{\frown}{PY}$，$\overset{\frown}{PZ}$。考察天球上的三个球面三角形：

$\triangle PNX$，$\triangle PNY$，$\triangle PNZ$，N 是轨道平面大圆与黄道的交点。

在球面$\triangle PNX$中，$\overset{\frown}{PN}=\omega+f$，$\omega$ 是6个轨道根数中的近日点角距，f 是行星在实际轨道上的极角；$\overset{\frown}{XN}=\Omega$，是6个轨道根数中的升交点黄经；$\angle PNX=180°-i$，$i$ 是6个轨道根数中的倾角。利用球面三角形的余弦定理，可以写出

$$\cos\overset{\frown}{PX}=\cos\Omega\cos(\omega+f)-\sin\Omega\sin(\omega+f)\cos i$$

在球面$\triangle PNY$中，$\overset{\frown}{PN}=\omega+f$，$\overset{\frown}{YN}=90°-\Omega$，$\angle PNY=i$。同样可以写出

$$\cos\overset{\frown}{PY}=\sin\Omega\cos(\omega+f)+\cos\Omega\sin(\omega+f)\cos i$$

在球面$\triangle PNZ$中，$\overset{\frown}{PN}=\omega+f$，$\overset{\frown}{ZN}=90°$，$\angle PNZ=90°-i$，也同样可以写出

$$\cos\overset{\frown}{PZ}=\sin(\omega+f)\sin i$$

于是 x，y，z 的值就计算出来了

$$\begin{cases}x=r[\cos\Omega\cos(\omega+f)-\sin\Omega\sin(\omega+f)\cos i]\\ y=r[\sin\Omega\cos(\omega+f)+\cos\Omega\sin(\omega+f)\cos i]\\ z=r\sin(\omega+f)\sin i\end{cases}$$

2. 从 x，y，z 计算日心球面赤道坐标 α，δ

在日心黄道直角坐标系中，X 指向春分点方向，Z 指向黄极方向，X-Y 平面在黄道平面上，从图4.3.4不难看出几何关系。

$$\begin{cases}x=r\cos\lambda\cos\beta\\ y=r\sin\lambda\cos\beta\\ z=r\sin\beta\end{cases}$$

式中，λ 和 β 分别是行星的日心黄经和黄纬值。由这组公式可以从 x，y，z 计算 λ，β 值。通过球面坐标转换（如用旋转矩阵法）不难将黄道坐标 λ、β 转换成赤道坐标 α、δ，计算公式（推导从略）为

$$\begin{cases}\sin\delta=\sin\varepsilon\cos\beta\sin\lambda+\cos\varepsilon\sin\beta\\ \cos\delta\cos\alpha=\cos\beta\cos\lambda\\ \cos\delta\sin\alpha=\cos\varepsilon\cos\beta\sin\lambda-\sin\varepsilon\sin\beta\end{cases}$$

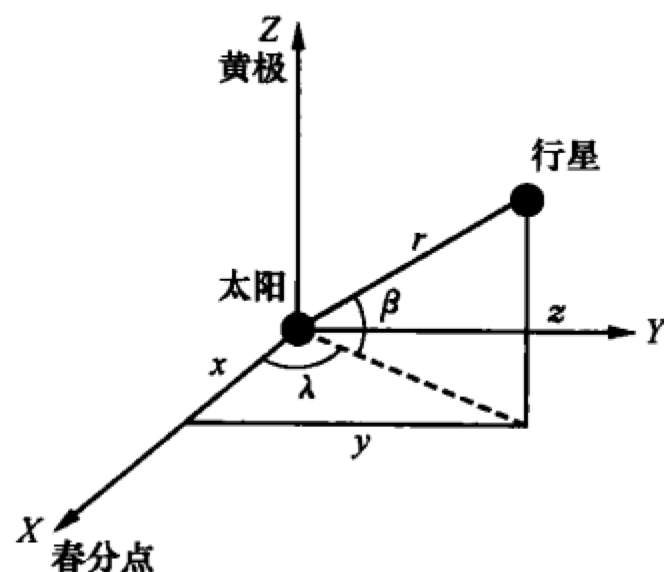


图4.3.4 日心黄道直角坐标系

ε 为黄赤交角。

3. 从日心赤道坐标（α，δ）计算实测站上所见 α、δ 值

观测者观测天体是在地面上某一具体地点。如何把日心赤道坐标（α，δ）再转换到实测站上真实所见的 α，δ 值，还需要经过以下几步计算：

（1）从日心（α，δ）转换到地心（α，δ），再转换到实测站（α，δ）。

（2）从轨道根数相应的历元开始至实际观测时刻为止，这段时间内，受岁差、章动的影响，天体位置要作订正，只订正岁差影响后的位置叫平位置，再订正章动影响后的位置叫真位置。

（3）真位置还要扣除因地球在空间中运动而产生的光行差影响，经此项订正后的位置叫

视位置。

(4) 视位置再要扣除大气折射所产生的位置歧变，最后才得到实际观测到的天体位置。

以上这些计算过程看似非常繁杂，但在现代计算机工作条件下，只要编制好足够严密的程序，计算问题是不难解决的。

定轨问题是计算星历表问题的逆向题，其实际的计算过程比前一个问题更要复杂一些，限于篇幅不再详细叙述，只介绍以下几个原则和步骤。

(1) 从实际观测到的高度和方位角，转换到 α、δ，加上大气折射订正得到视位置，加上光行差订正得到真位置，加上章动订正得到平位置，加上岁差订正得到某一指定历元的实测站平位置 (α, δ)，再转换到地心 (α, δ) 及日心 (α, δ)。

(2) 由三次 α、δ 的 6 个观测数据，通过一系列计算，最终获得某一历元的 6 个轨道根数。常用的经典方法有 3 种：

① Gauss 方法。由 3 组 (α, δ) 求出天体在某两个时刻的日心黄道直角坐标 (x_1, y_1, z_1; x_2, y_2, z_2)，然后再解算出 6 个轨道根数。

② Laplace 方法。由 3 组 (α, δ) 求出天体在某一个时刻的日心黄道直角坐标及速度分量 (x, y, z; $\dot{x}$, $\dot{y}$, $\dot{z}$)，然后再解算出 6 个轨道根数。

③ Olbers 方法。是 Gauss 方法在轨道为抛物线时的简化方法。对于抛物线轨道（如一部分彗星或小行星），未知的轨道根数只有 5 个 ($e=1$)，计算过程就简化了。

现代天体测量技术，如雷达测距、多普勒测速，直接获得的不是位置数据而是距离或速度数据，这些数据与位置数据相配合，可以更快更好地转换为轨道根数。在高速计算机条件下，还可利用级数展开的方法，使复杂方程的求解变得容易，因而发展出一些新的计算方法，在此不再一一介绍。

4.3.2　行星的视运动规律

1. 相对于太阳的行星视运动

行星什么时候能在天上见到，它的方位和亮度如何？都与太阳位置有关。在天球上，行星相对于太阳的运动情况，地内行星和地外行星有所不同。地内行星是指轨道在地球轨道以内的水星和金星；地外行星是指轨道在地球轨道外面的其余 5 颗行星。

1) 地内行星相对于太阳的运动

图 4.3.5 中，地内行星在轨道上有 4 个特殊位置：上合、下合、东大距、西大距。上合和下合，太阳与行星都在同一方位，黄经相等；上合时行星比太阳远，下合时行星比太阳近。东西大距是行星与太阳角距离最大的位置；在太阳东边的为东大距，在太阳西边的为西大距。由于地内行星公转角速度比地球快，所以相对而言，行星的位置是由上合向东大距方向运动。上合时，行星与太阳同升同落，不可能被看见。以后逐渐向东运动，到离开太阳一段角距后，当太阳落

山，天已变黑时，行星出现在西边地平线上，称为昏星。至东大距时，与太阳角距最大，可见时间最长，高度也最高。东大距后，行星转而向太阳靠拢，与太阳角距逐渐缩小，直到下合，又与太阳同升同落，不为人所见。再出现时，行星运动到太阳西边，日出以前出现在东方天际，称为晨星。西大距时与太阳角距最大，可见时间最长，高度也最高。东、西大距是观测的最好时机。由于轨道不是正圆，大距角不是常数，水星在 18°～28°，金星在 45°～48°。当太阳在地平线下 20°时，天空还相当亮，所以水星难得为人所见。而金星是常常可以见到的，它那灿烂若黄金般的光彩，非常惹人注目。中国古代称之为太白金星，早晨出现的叫启明星，黄昏出现的叫长庚星。地内行星同月亮一样有盈亏变化。上合时为盈，离地球最远；下合时为亏，离地球最近；东西大距时是半圆形；下合与大距之间最亮。金星的最大亮度会达到 $-4^{m}.5$，比天狼星亮 16 倍。

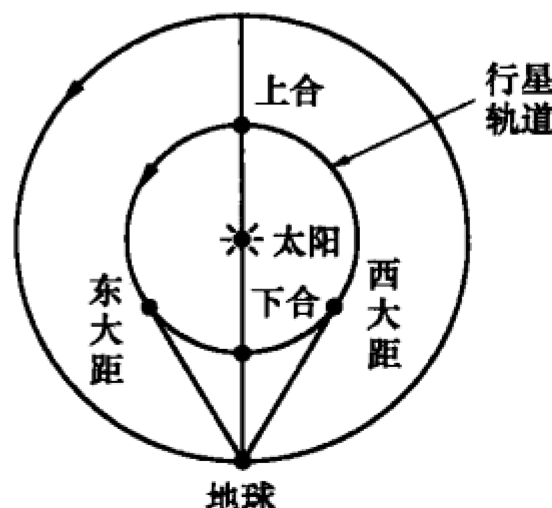


图 4.3.5 地内行星的运动

如果水星或金星下合发生在黄道面附近，会与太阳圆面重合，人们看到它们的影像从日面上缓缓通过，称为“凌日”。水星凌日平均每 100 年发生 13 次，最近的一次是 2006 年 11 月 9 日 3 时 12 分至 8 时 10 分（北京时间），但日出后，才能看见。因为水星的圆面非常小，它的凌日用肉眼是看不到的，必须借助望远镜才能观测（光盘图 4.3.6 水星凌日；光盘图 4.3.7 2006.11.9. 水星凌日；光盘图 4.3.8 带地景的水星凌日）。下一次水星凌日发生在 2016 年 5 月 9 日，但我国适逢半夜，无法观测。金星凌日每两次为一组，两次之间相隔 8 年，但两组之间却相隔 100 多年。最近的一组在 2004 年 6 月 8 日和 2012 年 6 月 6 日。2004 年 6 月 8 日这一次，中国以及欧亚大陆大部分地区都能看到全过程。许多爱好者拍下了精彩的照片（光盘图 4.3.9 2004 年 6 月 8 日金星凌日过程；光盘图 4.3.10 金星凌日照片，恰好有一架飞机通过；光盘图 4.3.11 金星凌日照片，恰好国际空间站飞过日面）。这次金星凌日对所有在世的人都是第一次亲见。过去以为不用望远镜也能看到金星凌日，事实证明对于大多数人是很难做到的。2012 年 6 月 6 日金星凌日，欧洲和中西亚只能在日出后见到后一段过程，北美地区只能在日落前见到前一段过程，而在我国中东部能见到全过程：从北京时间 6 时 10 分到 12 时 50 分左右。如果错过这一次大好机会，再下一次 2117 年 12 月 11 日金星凌日，所有在世的人都等不到了。1761 年金星凌日，只有在亚洲才能看到，法国一位名叫勒让提的天文学家，提前一年乘船去印度准备观测，辗转到达时，正值英法战争，英军不准法国人上岸，痛失观测良机。但他痴心不改，留居印度苦心等待 8 年，决心再次观测金星凌日。岂料天公不作美，临观测前 10

多分钟，突然电闪电鸣，风雨交加，待雨过天晴，金星已走出了日面。他想到有生之年再也没有机会看到金星凌日了，身心憔悴，竟病倒异乡。2 年后回到法国，科学院院士的职位早已被除名，财产也被别人继承了，幸亏后来得到一位善良女性的敬重与同情，才算有晚年的慰藉与补偿。

2）地外行星相对于太阳的运动

见图 4.3.12，地外行星也有 4 个特殊位置：合、冲、东方照和西方照。合时，行星离地球最远，黄经与太阳黄经相同；冲时，行星离地球最近，黄经与太阳黄经相差 180°；东方照和西方照，行星黄经与太阳黄经相差 90°，东方照在太阳东边，黄经比太阳黄经大 90°，西方照在太阳西边，黄经比太阳黄经小 90°。由于地外行星公转角速度比地球慢，所以相对而言，行星的位置是由合向西方照方向运动。合时，行星与太阳同升同落，不可能被看见。以后逐渐西移，黎明前从东方升起，日出前可观测一段时间，以后离太阳角距渐远，升起时间逐日提前，可观测时间增加。到西方照位置时与太阳角距 90°，日出时行星在南方最高位置，半夜即已升出地平，整个后半夜可以观测。到冲时，日落时升起，半夜中天，日出时方落，整夜都可以观测。再到东方照位置，行星在日落时到达中天，半夜没入地平，前半夜可以观测。冲是观测地外行星的最佳时期。由于地球轨道和行星轨道都不是正圆，每次冲，行星与地球距离不同，距离最近的冲叫“大冲”。火星冲每两年多发生一次，但大冲每隔 15 年或 17 年发生一次，而且总在 7 月和 9 月之间。最近一次火星大冲发生在 2003 年 8 月 29 日，视直径为 25″.1，位于宝瓶座。

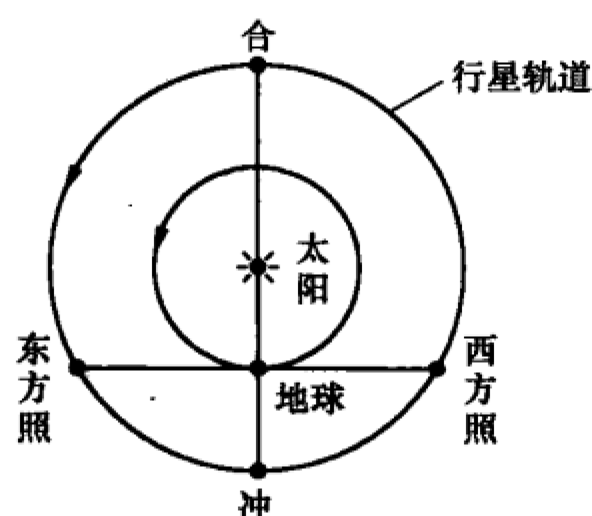


图 4.3.12　地外行星的运动

3）行星的会合周期

行星相对于太阳的某一个特殊位置重复的周期，如地内行星由上合到下一次上合，地外行星由冲到下一次冲的时间间隔，称为会合周期。

会合周期的计算公式称为会合运动方程式

$$\frac{1}{S}=\frac{1}{T}-\frac{1}{E}\quad（地内行星）$$

$$\frac{1}{S}=\frac{1}{E}-\frac{1}{T}\quad（地外行星）$$

式中，S 是会合周期，T 是行星绕太阳公转的周期，E 是地球绕太阳公转的周

期。该公式的推导可以这样来考虑（图 4.3.13）：设地球与地内行星从下合的位置出发，各自做公转运动。以日作为周期的单位，T 是行星转一圈所需要的日数，那么行星每天转$\frac{1}{T}$圈；同理，E 是地球转一圈所需要的日数，地球每天转过$\frac{1}{E}$圈。一天之中行星超前地球$\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{E}\right)$圈，等行星的超前量累积到整整一圈的时候，行星又来到与地球会合的位置，所需要的日数 S 当然等于 $1\Big/\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{E}\right)$日，这就得出了地内行星的会合运动方程式。其实，该计算公式也可以从图 4.3.13 中的三个角度关系直接看出来。将行星与地球调换一下位置，便得出地外行星的会合运动方程式。各大行星会合周期的数据见表 4.3.1。

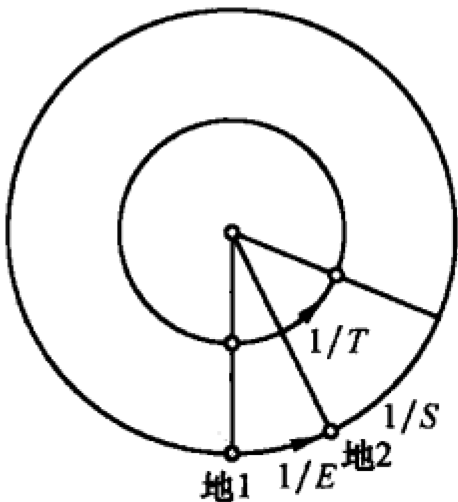


图 4.3.13 行星的会合运动

表 4.3.1 行星的会合周期

行星	会合周期/天	行星	会合周期/天
水星	116	土星	378
金星	584	天王星	370
火星	780	海王星	367
木星	399	冥王星	367

月亮的朔望周期就是月球与地球相对于太阳的会合周期，其数值也可以用会合运动方程式加以计算：令月球的公转周期 T=27.321 661 4 日，地球的公转周期 E=365.256 366 2 日，则月亮的朔望周期即可计算为

$$S=\frac{TE}{E-T}=29.530\,588\text{ 日}$$

事实上的过程是反过来的：先从实际观测测出月亮的平均朔望周期，再利用会合运动方程式来计算月球绕地球公转运动的周期。

2. 相对于恒星的行星视运动

由于行星和地球都在运动，相对于恒星背景，行星在天球上的运动，大部分时间沿黄经增加的方向（与太阳视运动同方向，自西向东运动），称为顺行。但也有时反方向运动，称为逆行。顺、逆转换期间，行星暂时没有运动，称为留。当行星相对于地球的运动方向与二者连线方向一致，或者说，当地球到行星的视线方向只有平行移动时，行星就出现留。地内行星的留发生在大距与下合之间。

地外行星的留发生在冲和方照之间。地外行星于合日前后在天球上的运动，相对于太阳是自东向西运动，但由于这种运动的速度远小于太阳相对于恒星自西向东的运动速度，所以行星相对于恒星而言，仍为自西向东运动，是顺行而不是逆行。

地内行星和地外行星在天球上运动及可见情况的全过程如图 4.3.14 所示。当行星、月亮两两之间以及它们与黄道附近的 5 颗亮恒星之间，黄经相同的时候，称为两者之间的“合”。这 5 颗亮恒星是：毕宿五（金牛 α）、轩辕十四（狮子 α）、角宿一（室女 α）、心宿二（天蝎 α）、北河三（双子 β）。如金星合月，火星合木星，土星合轩辕十四等。如果月亮与上述天体或其他天体完全重合，把它们挡在了身后，称为月掩星，如月掩金星、月掩心宿二等。月掩星是难得的天象，有一些特殊的研究可以利用月掩星的机会进行。行星掩行星，行星掩恒星，甚至小行星掩恒星是更为难得的天象。

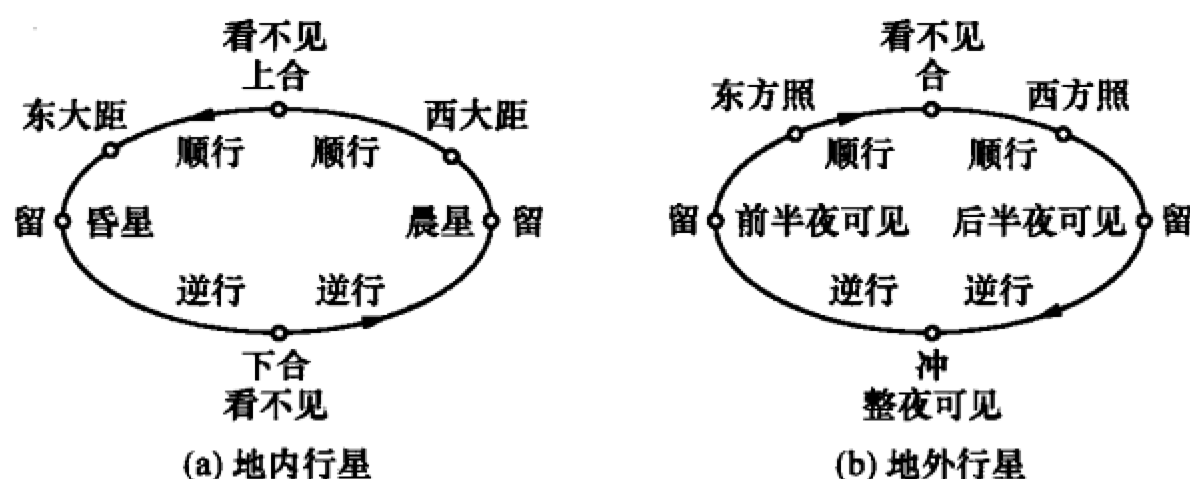


图 4.3.14　行星视运动的全过程

4.3.3　日食和月食

日食和月食是由太阳、月亮、地球 3 个天体的几何位置决定的。这 3 个天体的尺度和距离刚巧符合比例关系

$$\frac{\text{地月距离}}{\text{地日距离}}=\frac{\text{月球直径}}{\text{太阳直径}}$$

因此在地球上看日轮和月轮几乎大小相同。只是由于沿椭圆轨道运动，距离略有变化，日轮与月轮相比才有时略大有时略小。当月球、地球和太阳运动到同一条直线上，并且月亮在中间的时候，月轮与日轮重合，如果月轮略大，便完全遮住了太阳，天空顿时变为黑暗，星斗出现，气温突然降低，鸟兽惊飞疾走，这就是日全食；如果月轮略小，太阳只露出边上窄窄的一圈，形成日环食；如果月轮未与日轮完全重合；只挡住它的一部分的时候，就是日偏食。

日食、月食也可以用阳光下月球和地球的影子来说明。在图 4.3.15 中，月球的影子呈锥形，黑色区域是月球的本影区，斜线是半影区，本影锥尖向后延续

的部分是伪本影区。地球位置在影锥尖附近。如果地面的一部分处在本影区中（位置 1），看到的是日全食，处在半影区中看到的是日偏食，处在伪本影区（位置 2），看到的是日环食。如果地面一部分地区可见到日全食，另一部分地区又可见到日环食则称为日全环食。地球面积广大，看到日食的只是地球上一部分区域，特别是全食和环食，区域很小。由于地球自转和月球运动，见食区域在地面掠过，形成窄窄的带状区域，在这个区域里的居民，便先后看到日食。月影锥在地面上随月球公转自西向东运动，而由于地球自转，月影锥又在地面上自东向西运动，两者相反相消。但前者速度大于后者，结果月影锥在地面上仍是自西向东运动，所以日食带在地面上呈东西分布，西部的居民先看见日食，东部的居民后看见日食。全食带一般宽几十千米，长 1 000 千米或更短。偏食带比较宽广，带内各地的居民在不同时刻看到不同程度的日偏食。

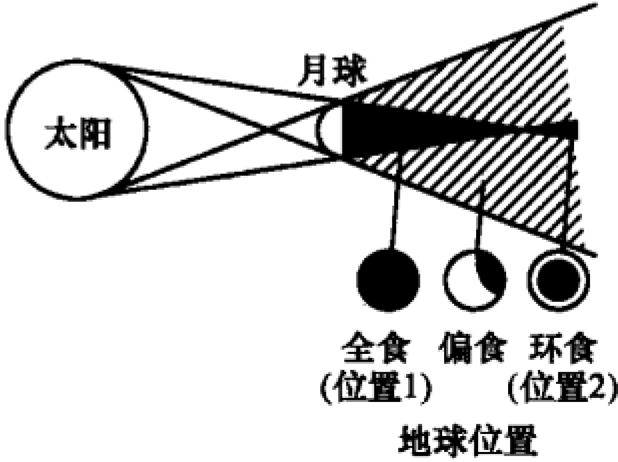


图 4.3.15　日食的成因

在天空中，月轮相对于日轮总是自西向东运动，日食总是先从日面的西边开始，东边结束。日食过程按时间的先后顺序分为 5 个阶段（偏食为 3 个），详细情况见图 4.3.16。从初亏到复圆一般为一两个小时以上。从食既到生光为全食时间，一般 2～3 分钟，最长 7 分 45 秒，最短只有几秒钟。

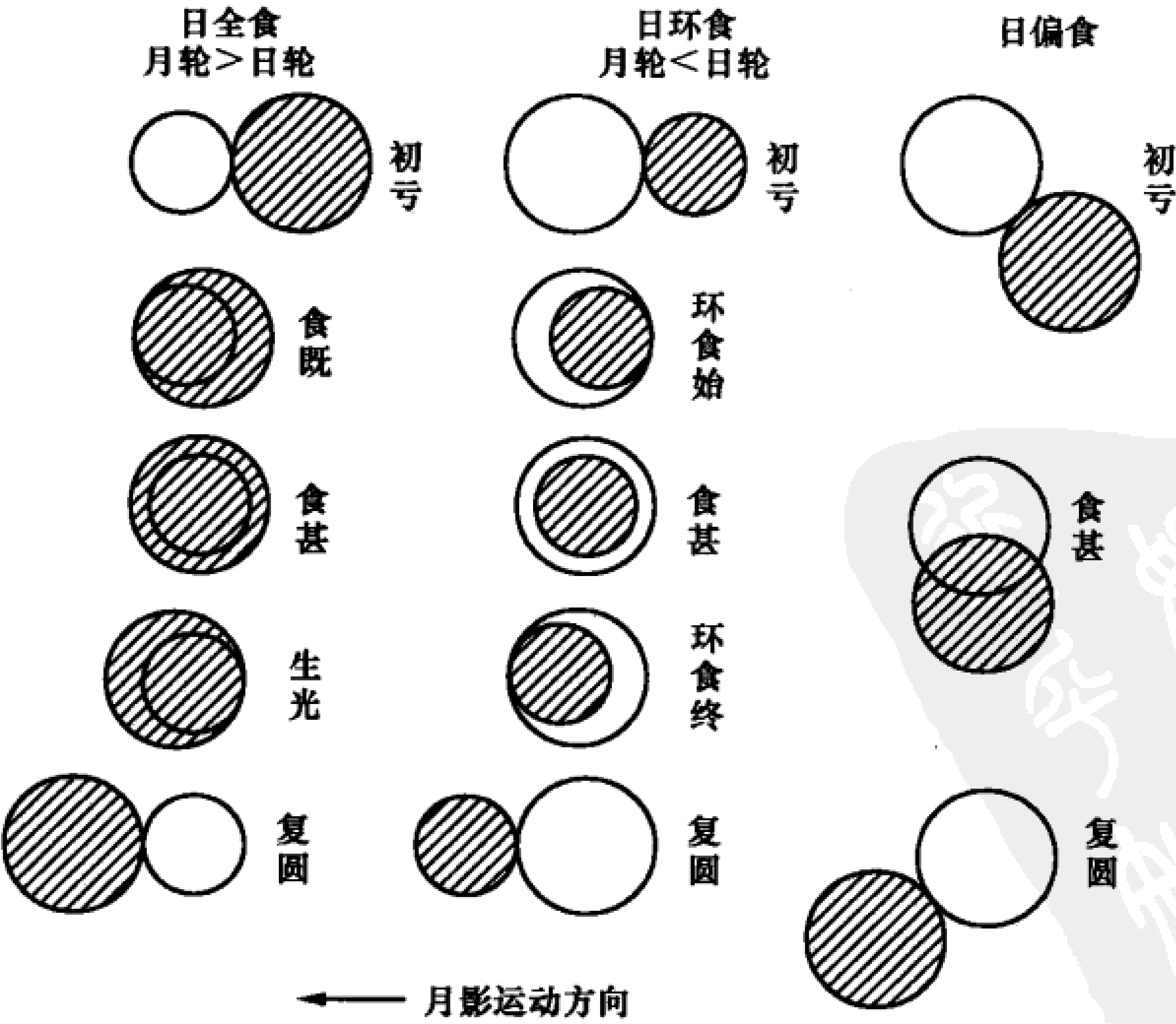


图 4.3.16　日食全过程

对全食和环食，月轮直径与日轮直径之比称为食分。显然，全食食分大于1，环食食分小于1。由于见食地点和时间的差异，月轮直径略有变化，食分也略有不同。对于偏食，食分等于食甚时日轮直径被挡部分所占的比值。

日食只能发生在月相朔的时候（农历初一），但由于月亮公转轨道（白道）与黄道不在一个平面上，朔时日、月通常只在同一方位而不一定在一条直线上，所以不一定发生日食。只有月球运动到黄道与白道交点附近又逢朔的时候，才会发生日食，一般每年至少2次，最多5次。每世纪平均发生日全食67.2次，环食82.2次，偏食82.5次，全环食4.8次，总共236.7次。全食的机会约占30%。因为全食带很窄，重复出现在地球上同一地区可能性很小。同一地点两次看见日全食的间隔一般在300年左右。

月食的情况与日食不同。月食一定发生在月相望的时候，月球钻进了地球的影子里，得不到太阳的光照，就发生月食（图4.3.17）。由于地球的本影远比月球范围大，所以月全食发生的机会多，时间也长，一般达2～3小时。如果月球从地球本影边缘掠过，只有部分进入本影，便形成月偏食。地球除本影外也有半影，可是月球落入地球半影时，月面只稍稍有一点变暗，肉眼觉察不出来，所以这种“半影月食”一般不叫月食。由于月球自西向东运动，月食总是从月轮的东边缘开始。月全食也包括5个阶段：初亏、食既、食甚、生光、复圆（图4.3.18）。

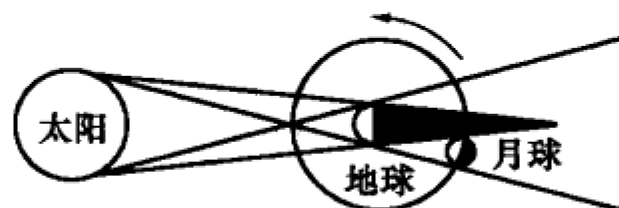


图4.3.17　月食的成因

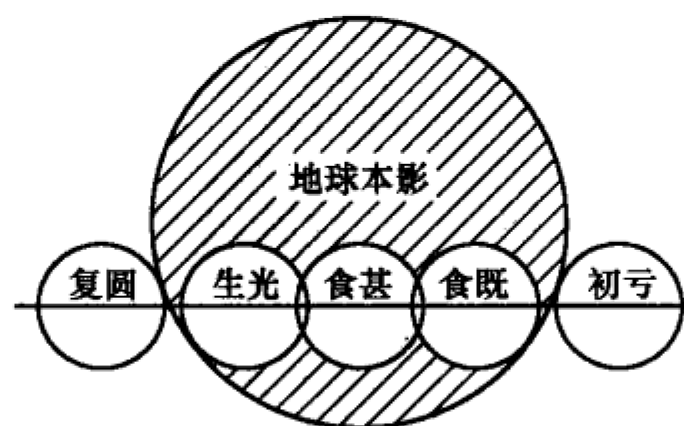


图4.3.18　月全食全过程

月食的各个阶段对地球上任一地区的居民都是同时发生的。只要能看得见月亮的地方，都能同时进行观赏。月全食时，月亮并未完全消失，仍然发出红铜色的微光。这是由于地球大气折射阳光，照亮月面所致。月食发生的机会比日食少，但因为可见月食的地区范围广大，所以同一地方的居民看到月食的机会比日食多。月食的食分规定为月轮进入地球本影的最大深度与月轮直径之比。月偏食的食分小于1，月全食的食分大于1。

在科学不发达的时代，日、月食常常引起人们恐慌，被认为是不祥之兆。现代人们知道了日、月食的道理，反而把它们当成公众乐于观赏的对象，特别是壮观的日全食，天文学家和业余爱好者常常不远千万里，赶赴全食带进行观测（光

盘图 4.3.19　2003 年 11 月 23 日南极大陆上的日全食)。对于业余天文家来说，最值得观赏和拍照留念的日全食景观有 4 项：①贝利珠。在日全食“食既”和“生光”两个瞬间，月轮刚好与日轮相切之际，从月球环形山的缝隙中漏出来的日光，像一串闪光的珍珠，十分美丽壮观。最早为英国业余天文家贝利(F. Baily) 1836 年作出科学解释，故名贝利珠（光盘图 4.3.20　日全食贝利珠)。②色球层和日珥。全食时，在“黑太阳”周围细细的一圈红色，这是色球层；从有的地方喷吐着火焰状的日珥，在放大的照片上清晰可见（光盘图 4.3.21　1999.8.11 法国日全食时的色球层和日珥)。③日冕。全食太阳周围的银珠色光芒，扩展到两三倍太阳范围。那是太阳的高层大气——日冕，光线柔和，形态各异，是比较容易拍照的对象（光盘图 4.3.22　1999.8.11 法国日全食时的日冕)。④日全食时天空显露出来的星空背景，特别是离“黑太阳”不远的水星和金星，在大白天突然显现，给人神奇美丽之感。即使是日偏食，也常常引起天文摄影爱好者的兴趣。他们用望远镜拍下太阳被食的全过程，加上地面景物的衬托，也能得到一幅幅有价值的大自然景观照片（光盘图 4.3.23　带地景的日偏食)。日环食虽然没有日全食那样昼夜突变的景观，但也是难得一见的（光盘图 4.3.24　2005.10.3 西班牙日环食风景)。光盘图 4.3.25 是日本 Hinode (Solar-B) 太阳观测卫星 2008 年 2 月 7 日，在离地面 600 千米的轨道上拍摄的日偏食 X 射线图像，十分难得和壮观（光盘图 4.3.25　2008.2.7. 高空卫星上拍摄的日偏食 X 射线图像)。这次日食地面上只有南极洲的一条窄带上才能看到。

日、月食的成因只与日、地、月 3 个天体的几何位置有关。只要精确掌握了这 3 个天体的运动规律，日、月食是可以准确加以计算和预报的。中国古代从汉武帝《太初历》开始，即对日、月食作出预报。历代都用日、月食发生的时刻检验历法的疏密。奥地利天文学家奥波尔泽（T. R. Oppolzer）1887 年出版《日月食典》，给出了公元前 1208～2161 年 8 000 次日食、公元前 1207～2163 年 5 200 次月食的详细资料，包括可以计算地面见食带的全部公式和数据。经近代计算机检验，只有极个别的地方有一些误差，是一本非常重要的日月食经典著作。当代中国有关日月食的预报数据，由中国科学院紫金山天文台负责计算与发布。表 4.3.2、表 4.3.3 分别列出了由该台发布的 1995～2020 年中国能见到的日食和月食表。

表 4.3.2　1995～2020 年我国可见日食表

日　期	类型中心带	我国主要城市的食分及食甚时间（北京时间）
1995 年 10 月 24 日	全食 伊朗 印度 太平洋	乌鲁木齐 0.46（11 时 20 分）　昆明 0.73（11 时 46 分） 成都 0.57（11 时 46 分）　西安 0.43（11 时 55 分） 广州 0.63（12 时 14 分）　武汉 0.45（12 时 10 分） 北京 0.24（12 时 08 分）　南京 0.37（12 时 20 分） 上海 0.36（12 时 28 分）　哈尔滨 0.07（12 时 26 分）

续表

日　期	类型中心带	我国主要城市的食分及食甚时间（北京时间）
1995年10月24日		台北0.49（12时35分）　香港0.64（12时17分） 澳门0.65（12时16分） 说明：南沙群岛可见全食
1997年3月9日	全食 中国 俄罗斯 北冰洋	乌鲁木齐0.94*（8时34分）　昆明0.57（8时10分） 成都0.70（8时18分）　西安0.77（8时26分） 广州0.51（8时13分）　武汉0.68（8时25分） 北京0.85（8时41分）　南京0.70（8时31分） 上海0.67（8时32分）　哈尔滨0.90（9时02分） 漠河1.02（9时10分）　台北0.53（8时23分） 香港0.49（8时13分）　澳门0.49（8时12分） 说明：新疆、黑龙江可见全食
1998年8月22日	环食 印度洋 印尼 太平洋	昆明0.29（8时23分）　成都0.13（8时27分） 西安0.04（8时32分）　广州0.38（8时30分） 武汉0.16（8时35分）　南京0.12（8时40分） 上海0.14（8时43分）　台北0.33（8时41分） 香港0.41（8时31分）　澳门0.41（8时31分）
1999年8月11日	全食 大西洋 法国 伊朗 印度	乌鲁木齐0.48（20时01分）　昆明0.27*（19时46分） 成都0.37*（19时49分）　西安0.20*（19时36分） 拉萨0.70（20时21分）　西宁0.51*（20时08分） 银川0.42*（19时53分）　兰州0.48*（19时59分）
2002年6月11日	环食 太平洋 墨西哥	昆明0.25（6时21分）　成都0.16（6时27分） 西安0.14（6时31分）　广州0.39（6时16分） 武汉0.25（6时25分）　北京0.12（6时39分） 南京0.27（6时27分）　上海0.32（6时26分） 哈尔滨0.13（6时51分）　台北0.44（6时17分） 香港0.42（6时15分）　澳门0.41（6时15分）
2003年5月31日	环食 格陵兰	乌鲁木齐0.19（11时13分）
2004年10月14日	偏食	沈阳0.08（10时07分）　长春0.15（10时08分） 哈尔滨0.21（10时08分）
2005年10月3日	环食 大西洋 非洲 印度洋	拉萨0.07（19时32分）
2006年3月29日	全食 巴西 大西洋 非洲	乌鲁木齐0.77（19时50分）　成都0.09*（19时19分） 拉萨0.31（19时55分）　兰州0.26*（19时22分） 西宁0.39*（19时31分）　银川0.18*（19时13分）

续表

日 期	类型中心带	我国主要城市的食分及食甚时间（北京时间）
2007年3月19日	偏食	乌鲁木齐0.72（10时07分） 昆明0.36（9时42分） 成都0.43（9时53分） 西安0.43（10时04分） 广州0.19（9时47分） 武汉0.30（10时03分） 北京0.40（10时23分） 南京0.25（10时10分） 上海0.20（10时12分） 哈尔滨0.33（10时45分） 台北0.10（9时59分） 香港0.17（9时46分） 澳门0.17（9时45分）
2008年8月1日	全食 加拿大 北冰洋 俄罗斯 中国	乌鲁木齐0.95（19时07分） 昆明0.81（19时35分） 成都0.91（19时27分） 西安0.99（19时20分） 广州0.47*（19时07分） 武汉0.87*（19时16分） 北京0.92（19时10分） 南京0.65*（19时01分） 上海0.40*（18时48分） 哈尔滨0.82（18时57分） 郑州0.99（19时18分） 兰州0.99（19时19分） 银川0.99（19时15分） 石家庄0.95（19时13分） 台北0.03*（18时37分） 香港0.37*（19时03分） 澳门0.41*（19时05分） 说明：新疆、甘肃、内蒙、宁、陕、晋、豫可见全食
2009年1月26日	环食 大西洋 印尼	昆明0.19（18时04分） 西安0.01（18时02分） 广州0.35（18时02分） 武汉0.14*（17时52分） 南京0.05*（17时31分） 上海0.02*（17时23分） 台北0.24*（17时33分） 香港0.38（18时02分） 澳门0.37（18时02分）
2009年7月22日	全食 印度 中国 太平洋	乌鲁木齐0.49（9时10分） 昆明0.88（9时08分） 成都1.00（9时12分） 西安0.90（9时20分） 广州0.77（9时23分） 武汉1.03（9时26分） 北京0.72（9时31分） 南京0.99（9时34分） 上海1.01（9时38分） 哈尔滨0.52（9时47分） 杭州1.02（9时36分） 台北0.84（9时40分） 香港0.75（9时25分） 澳门0.74（9时24分） 说明：藏、滇、川、鄂、湘、赣、皖、苏、浙可见全食
2010年1月15日	环食 印度洋 缅甸 中国	乌鲁木齐0.41（16时27分） 昆明0.90（16时46分） 成都0.89（16时48分） 西安0.87（16时51分） 广州0.71（16时53分） 武汉0.88（16时54分） 北京0.82（16时52分） 南京0.87（16时56分） 上海0.82（16时56分） 哈尔滨0.44*（16时13分） 郑州0.91（16时53分） 济南0.90（16时54分） 台北0.66（16时57分） 香港0.68（16时54分） 澳门0.68（16时53分） 说明：郑州可见环食，滇、川、黔、鄂、湘、豫、皖、鲁、苏可见环食

续表

日　期	类型中心带	我国主要城市的食分及食甚时间（北京时间）
2011年1月4日	偏食	乌鲁木齐0.24（18时08分）
2011年6月2日	偏食	长春0.21*（4时01分）　哈尔滨0.23（4时01分）
2012年5月21日	环食 中国 日本 太平洋 美国	乌鲁木齐0.42（6时45分）　昆明0.78*（6时23分） 成都0.73（6时21分）　西安0.71（6时25分） 广州0.96（6时09分）　武汉0.82（6时19分） 北京0.67（6时33分）　南京0.83（6时20分） 上海0.87（6时19分）　哈尔滨0.66（6时45分） 台北0.94（6时10分）　香港0.95（6时08分） 澳门0.95（6时08分） 说明：福州、广州、台北、香港、澳门可见环食，桂、粤、赣、闽、台、浙可见环食
2015年3月20日	全食 大西洋 北冰洋	乌鲁木齐0.06（19时13分）
2016年3月9日	全食 印尼 太平洋	昆明0.23（8时48分）　成都0.11（8时58分） 西安0.05（9时09分）　广州0.31（8时57分） 武汉0.15（9时11分）　南京0.14（9时20分） 上海0.18（9时23分）　台北0.31（9时14分） 香港0.33（8时57分）　澳门0.33（8时56分）
2018年8月11日	偏食	乌鲁木齐0.20（18时44分）　成都0.08（19时06分） 西安0.19（19时0分）　武汉0.15（19时03分） 北京0.34（18时50分）　南京0.19*（18时52分） 上海0.11*（18时40分）　哈尔滨0.48（18时39分）
2019年1月6日	偏食	西安0.13（8时22分）　武汉0.10（8时24分） 北京0.32（8时33分）　南京0.18（8时29分） 上海0.19（8时32分）　哈尔滨0.49（8时51分） 台北0.06（8时29分）
2019年12月26日	环食 阿拉伯半岛 印度 印尼	乌鲁木齐0.17（12时30分）　昆明0.40（13时09分） 成都0.29（13时13分）　西安0.22（13时28分） 广州0.44（13时49分）　武汉0.30（13时48分） 北京0.15（13时46分）　南京0.29（14时0分） 上海0.32（14时08分）　哈尔滨0.12（14时02分） 台北0.45（14时13分）　香港0.46（13时53分） 澳门0.46（13时51分）
2020年6月21日	环食 非洲 阿拉伯半岛 中国	乌鲁木齐0.61（15时0分）　昆明0.86（15时44分） 成都0.94（15时42分）　西安0.80（15时46分） 广州0.90（16时05分）　武汉0.86（15时58分） 北京0.59（15时49分）　南京0.78（16时02分） 上海0.77（16时05分）　哈尔滨0.36（15时50分） 拉萨0.95（15时16分）　长沙0.94（15时59分） 台北0.94（16时12分）　香港0.89（16时07分） 澳门0.88（16时06分） 说明：藏、川、黔、湘、赣、闽、台可见环食

注：带*号的为带食日出或日没，时间及食分均指日出或日没时。

表 4.3.3 1995～2020 年我国可见月食表

日 期	类型	食分	初亏时间	复圆时间
1995 年 4 月 15 日	偏食	0.12	19 时 40 分	20 时 55 分
1996 年 4 月 4 日	全食	1.38	6 时 20 分	9 时 58 分
1997 年 9 月 17 日	全食	1.20	1 时 08 分	4 时 25 分
1999 年 7 月 28 日	偏食	0.40	18 时 21 分	20 时 42 分
2000 年 7 月 16 日	全食	1.77	19 时 57 分	23 时 53 分
2001 年 1 月 10 日	全食	1.19	2 时 42 分	5 时 59 分
2001 年 7 月 5～6 日	偏食	0.50	21 时 35 分	0 时 16 分
2003 年 11 月 9 日	全食	1.02	7 时 32 分	11 时 04 分
2004 年 5 月 5 日	全食	1.31	2 时 49 分	6 时 12 分
2005 年 10 月 17 日	偏食	0.07	19 时 34 分	20 时 32 分
2006 年 9 月 8 日	偏食	0.19	2 时 05 分	3 时 37 分
2007 年 3 月 4 日	全食	1.24	5 时 29 分	9 时 11 分
2007 年 8 月 28 日	全食	1.48	16 时 50 分	20 时 23 分
2008 年 8 月 17 日	偏食	0.81	3 时 35 分	6 时 44 分
2010 年 1 月 1 日	偏食	0.08	2 时 51 分	3 时 54 分
2010 年 6 月 26 日	偏食	0.54	18 时 16 分	21 时 0 分
2010 年 12 月 21 日	全食	1.26	14 时 32 分	18 时 01 分
2011 年 6 月 16 日	全食	1.71	2 时 21 分	6 时 01 分
2011 年 12 月 10～11 日	全食	1.11	20 时 45 分	0 时 18 分
2012 年 6 月 4 日	偏食	0.38	17 时 59 分	20 时 06 分
2013 年 4 月 26 日	偏食	0.02	3 时 51 分	4 时 25 分
2014 年 10 月 8 日	全食	1.17	17 时 13 分	20 时 33 分
2015 年 4 月 4 日	全食	1.00	18 时 15 分	21 时 45 分
2017 年 8 月 8 日	偏食	0.25	1 时 21 分	3 时 18 分
2018 年 1 月 31 日	全食	1.32	19 时 47 分	23 时 10 分
2018 年 7 月 28 日	全食	1.61	2 时 23 分	6 时 18 分
2019 年 7 月 17 日	偏食	0.67	4 时 08 分	6 时 59 分

1997 年 3 月 9 日的日全食是 20 世纪中国能见到的最后一次日全食。刚好赶上一颗亮彗星海尔-波普在近日点附近，与日全食同时，在黑太阳旁边同显一颗彗星的风采，这种特殊天象有史以来只发生过 4 次，前 3 次是：1882 年 5 月 17 日在埃及，1947 年 5 月 20 日在巴西，1948 年 11 月 1 日在肯尼亚。这次日全食和彗星同现，在中国科学院、中国天文学会和黑龙江地方政府的组织下，300 多人云集中国领土最北端的漠河县，其中有中国科学院院士、天文学家、大中小学师生、新闻工作者及各界天文爱好者，冒着零下 35℃的严寒参加观测，仅业余级的天文望远镜就有 47 台，拍摄了大量贝利珠、钻石环、日珥和日冕的精美照片。中央电视台在现场通过卫星向全世界直播实况，全国各地掀起了观测日偏食和普及天文知识的热潮（光盘图 4.3.26 黑龙江漠河日全食观测现场）。

21 世纪的前 20 年内，在中国境内最有价值的日食有 5 次。

2008 年 8 月 1 日的日全食。新疆、甘肃、内蒙、宁夏、陕西、山西和河南等部分地区可看到全食。中国科学院、中国天文学会选择了两处最佳观测地点，

一处在新疆哈密伊吾县的苇子峡乡，来自世界各地的天文工作者和天文爱好者超过 2500 人云集于此进行日全食观测，海峡两岸四地天文科普大会也在此同时召开，当地政府为此次日全食观测专门修建了太阳历广场永久性建筑（光盘图 4.3.27　新疆伊吾日全食观测现场）。另一处在甘肃酒泉金塔县的大庄子乡，日全食期间在此举行了太阳磁场、日冕与空间天气国际研讨会和东亚青年天文学家研讨会。

2009 年 7 月 22 日的日全食。西藏、云南、四川、湖北、湖南、江西、安徽、江苏、浙江和上海等部分地区可看到全食，全食过程长达 6 分钟，而且经过数座人口稠密、文化发达的特大型城市以及长江流域广大地区，应是一次最有观测价值的日全食。中国天文学会曾建议国际天文学联合会第 27 次大会届时来中国上海召开，让全世界一流的天文学家目睹这次重要的日全食。可惜这个议案以一票之差被否决。

2010 年 1 月 15 日的日环食。云南、四川、贵州、湖北、湖南、河南、安徽、山东和江苏等部分地区可看到环食，环食时间长达 4 分钟。

2012 年 5 月 21 日的日环食。广西、广东、江西、福建、台湾、浙江、香港和澳门等部分地区可看到环食，环食时间长达 4 分钟。

2020 年 6 月 21 日的日环食。西藏、四川、贵州、湖南、江西、福建和台湾等部分地区可看到环食。

2021 年～2100 年全球可见的日食列于四幅光盘图中（光盘图 4.3.28　2021—2040 全球日食图；光盘图 4.3.29　2041—2060 全球日食图；光盘图 4.3.30　2061—2080 全球日食图；光盘图 4.3.31　2081—2100 全球日食图）。图中蓝色的为全食，深红色的为环食，银红色的为全环食。中国境内可以看到的有：2030 年 6 月 1 日环食，2034 年 3 月 20 日全食，2035 年 9 月 2 日全食，2041 年 10 月 25 日环食，2057 年 7 月 1 日环食，2060 年 4 月 30 日全食，2063 年 8 月 24 日全食，2064 年 2 月 17 日环食，2074 年 1 月 27 日环食，2085 年 6 月 22 日环食，2088 年 4 月 21 日全食，2089 年 10 月 4 日全食，2095 年 11 月 27 日环食。其中重要的几次是：2035 年 9 月 2 日，全食带经过西北、华北地区和北京城区，这是北京城 400 年来才有的机遇；2060 年 4 月 30 日，全食带经过西北地区；2074 年 1 月 27 日，环食带经过西南、西北、东北地区；2089 年 10 月 4 日，全食带经过西南、华东地区。

4.4　行星际飞行器的轨道问题

4.4.1　二体问题中速度与轨道的关系

从二体问题微分方程的解，可以获得关于运动速度 v 的公式（称为活力公式，或运动能

量公式）

$$v^2 = G(M+m)\left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a}\right)$$

式中，G 是万有引力常数，M、m 分别是两个天体的质量，r 是至质量中心的距离，a 是绕质量中心运动的轨道的长半径。活力公式是能量守恒定律的反映。它维持着动能 $\frac{1}{2}mv^2$ 与引力势能 $-\frac{\mu m}{r}$ 之和为常数 $-\frac{\mu m}{2a}$ 的关系，其中 $\mu=G(M+m)$。

对正圆轨道，$a=r$，$v_0=\sqrt{G(M+m)/r}$；

对抛物线轨道，$a=\infty$，$v_1=\sqrt{2}v_0$；

如果在某一位置 r 处，飞行器达到不同的速度，则其运行轨道将取不同的类型（图 4.4.1）。

当 $v<v_0$ 时，取椭圆轨道 1，远点在该处；

当 $v=v_0$ 时，取正圆轨道 2；

当 $v_0<v<v_1$ 时，取椭圆轨道 3，近点在该处；

当 $v=v_1$ 时，取抛物线轨道 4，离去的方向与来的方向平行；

当 $v>v_1$ 时，取双曲线轨道 5，离去的方向与来的方向相差一个角度。

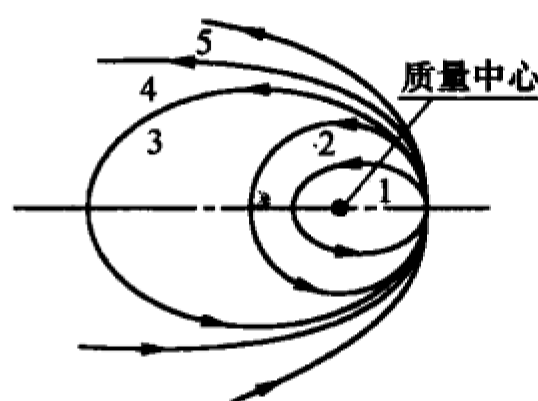


图 4.4.1 速度与轨道的关系

v_0 称为环绕速度，v_1 称为逃逸速度。

在地面上抛掷物体，速度一般都小于 v_0，如果不计空气阻力，物体的飞行轨道应是椭圆。但按通常的说法，抛体的运动轨迹是抛物线。其实，后一种说法是近似的，它忽略了球形大地上不同位置处重力加速度方向的微小差异。

4.4.2 三种宇宙速度的计算

三种宇宙速度是指在地球表面发射人造天体时，三种不同的发射速度。第一宇宙速度指环绕地球飞行的最低速度；第二宇宙速度指脱离地球引力场绕太阳飞行的最低速度；第三宇宙速度指脱离太阳引力场，飞出太阳系的最低速度。

第一宇宙速度显然就是对地球表面的环绕速度，$v_0=\sqrt{G(M+m)/r}$，M 是地球质量，m 是飞行器质量，r 是地球半径。忽略 m，注意到 $GM=r^2g$（从 $F=G\frac{Mm}{r^2}$ 及 $F=mg$ 立即可以推知），g 是地球表面重力加速度。于是，$v_0=\sqrt{rg}$，取 $r=6\,378$ 千米，$g=9.8$ 米/秒^2，可算出 $v_0=7.9$ 千米/秒。按此速度飞行，绕轨道一周的时间 $T=2\pi r/v_0$ 秒≈1 小时 24 分。

第二宇宙速度就是对地球表面的逃逸速度，在活力公式中令 $a=\infty$，即得 $v_1=\sqrt{2}v_0=11.2$ 千米/秒。

第三宇宙速度是在地球位置处对太阳引力的逃逸速度。地球绕太阳公转可近似认为是圆轨道，那么地球公转的速度就是在地球位置处对太阳引力的环绕速度，其值为

$$2\pi \text{ 天文单位}/365.242\,2 \text{ 日} \approx 29.8 \text{ 千米/秒}$$

逃逸速度为$\sqrt{2}$×环绕速度＝42.1千米/秒。如果轨道设计为入轨时与地球公转方向相同，则可借助地球公转的速度，于是飞行器自身的速度可减为（42.1－29.8）千米/秒＝12.3千米/秒。需注意这是飞行器脱离地球引力束缚后应达到的速度。脱离引力束缚，需要在发射时达到第二宇宙速度 v_1。从能量的角度来考虑，要想获得第三宇宙速度 v_2，付出的能量应当等于脱离地球引力束缚所需要的能量加上能达到12.3千米/秒速度所需要的能量。能量与速度的平方成正比。于是，应当有

$$v_2^2 = v_1^2 + (12.3\ \text{千米 / 秒})^2$$

已知 v_1＝11.2千米/秒，所以

$$v_2 = \sqrt{v_1^2 + (12.3)^2}\ \text{千米 / 秒} = 16.7\ \text{千米 / 秒}$$

这才是最后算出的第三宇宙速度。表4.4.1列出了太阳系各大行星和月球表面的环绕速度和逃逸速度。

表4.4.1　太阳系天体的宇宙速度（单位：千米/秒）

天　体	环绕速度 v_0	逃逸速度 v_1
水星	3.0	4.3
金星	7.3	10.3
火星	3.5	5.0
木星	42.1	59.5
土星	25.2	35.6
天王星	15.1	21.4
海王星	16.7	23.6
冥王星	0.85	1.2
月球	1.7	2.4

4.4.3　行星际飞行器的轨道设计

行星际飞行器除人造地球卫星外，还包括在太阳系行星际空间飞行的人造天体，如飞往行星或绕过行星的宇宙飞船、命中行星（硬着陆和软着陆）的火箭和绕某行星运动的人造卫星等。行星际飞行器的飞行过程大致可分为3个阶段：①出发阶段。从地球表面发射到脱离地球引力作用范围。②中途阶段。从离开地球引力作用范围到进入目标行星引力作用范围。③到达阶段。在目标行星引力范围内。如果飞行目的是掠过目标行星，则最后阶段的飞行器轨道通常设计为围绕目标行星的双曲线轨道；如果要使飞行器成为目标行星的人造卫星或在行星表面着陆，需要激活随带的制动火箭使飞行器减速，或者利用行星大气层的阻力使飞行器减速。①、③两个阶段时间很短，但过程比较复杂，中途阶段是时间很长的轨道飞行阶段，也是飞行器运动的主要阶段。

中途阶段的轨道设计非常重要。最节省燃料的轨道是双切轨道，即在近日点和远日点分别与地球轨道和目标行星轨道相切的日心椭圆轨道（图4.4.2）。沿

双切轨道到达目标行星所需的时间是双切轨道公转周期的一半。表4.4.2列出了沿双切轨道飞往各大行星所需的时间和发射速度。如果按抛物线轨道飞往地外行星，时间可大为缩短，但发射速度要高一些，需要多消耗燃料。按抛物线轨道飞往地外行星所需的时间和发射速度也列于表4.4.2中。实际飞行时常设计一种过渡性的驻留轨道，它们是在地球或目标行星附近围绕地球或目标行星飞行的卫星轨道。发射时，飞行器先发射到地球附近的驻留轨道上，在设计好的预定时间点燃随行火箭，再进入主轨道。到达目标行星时，再次点燃随行火箭进入目标行星的驻留轨道，然后选择合适时机在行星表面的预定地点着陆。

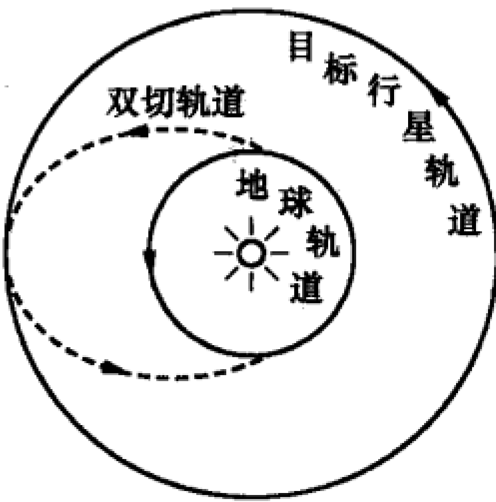


图4.4.2 双切轨道

表4.4.2 发往各大行星所需的时间和速度

飞往地点	双切轨道		抛物线轨道	
	到达时间/年	发射速度/千米·秒$^{-1}$	到达时间/年	发射速度/千米·秒$^{-1}$
水星	0.288 8	13.49	/	/
金星	0.399 9	11.47	/	/
火星	0.708 7	11.57	0.191	16.67
木星	2.731	14.23	1.108	16.67
土星	6.048	15.20	2.530	16.67
天王星	16.03	15.89	6.776	16.67
海王星	30.60	16.15	12.965	16.67
冥王星	45.46	16.27	19.276	16.67

如果飞行器需要返回（载人飞行必须考虑返回），原则上要重新经历上述各个阶段，只是过程相反。有一种节省燃料的做法是把返程所需的大部分燃料做成分体式卫星，储存在驻留轨道上，不随同着陆，飞行器返回时，从驻留轨道上取用。这种设计可节省返程燃料的90%。当然如何在驻留轨道上实现飞行器与燃料卫星的对接，技术要求是很高的。

由于各大行星轨道都不是正圆，又不在同一平面上，对人造飞行器有很复杂的摄动影响，它们与人造飞行器之间都不是单纯的二体问题。飞行器还要考虑飞行途中太阳强烈爆发的影响和穿过小行星带时的安全问题。真正付诸实施的轨道设计是难度非常高的工作。

4.4.4 定点通信卫星的特殊轨道和发射过程

当今时代信息网络遍布世界，电视节目通达每一个家庭。在美国深更半夜能

适时收看北京奥运会实况；在南极，伴着灿烂阳光可欣赏中国各地的除夕联欢。国际漫游电话随时可以拨通，空间的望远镜观测信息可以实时传回地球，这一切都有赖于一件人类现代文明创造的天外之物——定点通信卫星。它高悬在赤道上空 36 000 千米处，看似一动不动地默默工作着。其实，它以每秒 3 千米的速度绕地球运动，与地球自转同步，周期是一个恒星日——86 164 秒，与地面相对静止。它只能定位于赤道上空。因为若在其他位置上空，通过地心的卫星轨道平面必然与赤道面相交一个角度，即使周期与地球自转同步，也会扫过地面上不同纬度的地区，而不能做到定点；经它转发的通信信号就要随时改变方向，给发射和接收信号造成很大困难。如果采用赤道上空的椭圆同步轨道那也不行，因为椭圆轨道上的卫星，公转速度快慢不均，与地面点有东西方向的超前落后，高度也起伏变化，依然不能实现定点。所以定点通信卫星只能取赤道上空的正圆轨道，而且高度是唯一的。

请看以下的计算：

如前所述，圆轨道卫星的运动速度 $v_0=\sqrt{G(M+m)/r}$，r 是卫星至地心的距离，m 是卫星质量。忽略 m，再利用 $GM=r_0^2g$，可得

$$v_0=\sqrt{r_0^2g/r}$$

r_0 是地球半径。同步的要求是周期 $T=86\,164$ 秒，故应有

$$\frac{2\pi r}{T}=v_0=\sqrt{\frac{r_0^2g}{r}}$$

不难推导出

$$r^{\frac{3}{2}}=\frac{Tr_0\sqrt{g}}{2\pi}$$

代入数据 $r_0=6\,378$ 千米，$g=9.8$ 米/秒^2，算出 $r=42\,166$ 千米。减去 r_0，即得卫星至地面的距离 35 788 千米，这个高度是唯一的。

定点通信卫星原则上只要 3 颗，沿赤道均匀分布，就可达到全球通信的目的（图 4.4.3），南北极区有一部分盲区，可通过其他方式转发。但实际上各个国家根据自己的需要，在赤道上空沿线各处安放了多个通信卫星。由于电源损耗和设备老化等原因，通信卫星有一定的寿命，一般在 10 年左右，报废的卫星不能消除，新的卫星又上去了，造成这条对人类至为宝贵的黄金轨道上有过分拥挤或引发国际争端的潜在危险，需要世界各国之间协商解决。

定点通信卫星不是直接发射到轨道上去的。它的发射过程通常分 3 个步骤（图 4.4.4）：①先用多级火箭中的一级或两级将卫星送至低空圆轨道。②至适当时机点燃中间一级火箭从第一加速点加速，登上椭圆中间轨道，使轨道远地点在 36 000 千米高度。③在远地点（第二加速点）处点燃最后一级火箭完成送上高空圆轨道的发射任务。

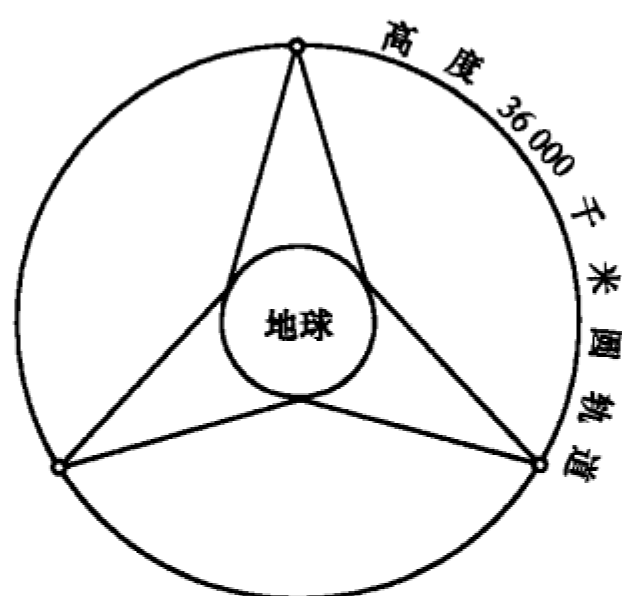


图 4.4.3 全球定点通信卫星

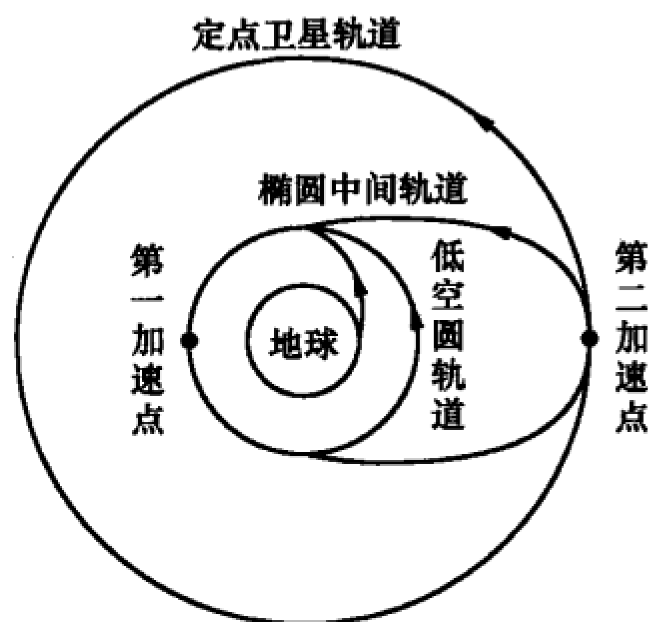


图 4.4.4 通信卫星发射轨道

现代定点通信卫星不只是简单反射地面发来的通信信号，它也装备有复杂的电子设备，对信号随时进行调制和放大等技术处理。这样的卫星称为有源通信卫星。卫星在与地球同步公转的同时，还要求自身自转，并且周期也与地球同步，使信号接受与发射装置始终对准地球上同一目标。运转过程中还要克服来自地球以外的摄动及其他复杂因素的干扰，以保持稳定的位置和自转及公转速度。卫星上必须载有相应的动力装置，在地面中心指令控制下适时完成这些姿态控制工作。

4.5 太阳系小天体

4.5.1 小行星

早在 17 世纪初，开普勒就从“宇宙和谐”的观点，认为在火星与木星之间过于宽阔的地带应当有一颗未知的行星。1801 年元旦，意大利天文学家皮亚奇 (G. Piazzi) 发现了第一颗小行星，经数学家高斯计算其轨道，确实位于火星与木星之间，直径约 1 000 千米，相当于月球直径的 1/4，取名为谷神星。至 1807 年，3 颗最大的及 1 颗较大的小行星相继被发现，它们是谷神星、智神星（直径 522 千米）、婚神星（直径 265 千米）、灶神星（直径 525 千米），其中谷神星最大，相当于中国的青海省；婚神星最小，比最小的省份海南省略小。这 4 颗小行星被发现后，38 年没有再发现过。人们以为这是仅有的 4 颗，并把它们当做大行星看待。然而，自 1845 年第 5 颗小行星义神星被发现之后，小行星不断地时有发现，特别是在现代技术条件下，被发现的小行星总数越来越多。截至 2009 年 4 月 9 日，已确认轨道并获得国际永久编号的小行星已达 212 999 颗。小行星的总数，直径在 100 千米以上的估计有约 200 颗，在 30 千米以上的约有 1 000 颗，在 1 千米以上的超过 100 万颗。小行星大都不是球形。测定它们的真实形状和大小是十分困难的。早期用直接测量角直径来估计大小，可靠性很差。近代用

光干涉技术及小行星掩恒星时的亮度变化观测来推算小行星的直径。按直径大小排在前15位的小行星列于表4.5.1。小行星的质量更难测定，用引力摄动方法得出的3颗最大的小行星的质量为：谷神星 1.2×10^{21} 千克，智神星 2.1×10^{20} 千克，灶神星 2.7×10^{20} 千克。据估计所有小行星加在一起的总质量不到地球质量的1/1 000，而前4、5颗小行星占总质量的一半以上。小行星集中的区域在火星与木星之间，距太阳2.17～3.64天文单位，形成宽约2亿千米的小行星带。大多数小行星是一些形状很不规则、表面粗糙、结构松散的硅酸盐石块，有的含碳较多，有的有较多的金属成分。小行星也有自转，周期一般为2～16小时，自转轴有各种取向，没有规律。1996年2月17日，美国宇航局发射了专门探测433号小行星爱神星（Eros）的宇宙飞船，于2000年2月14日到达爱神星上空，对之进行近距离考察，2001年2月12日实现人类首次在小行星上的软着陆。光盘图4.5.1为宇宙飞船在距爱神星1 800千米处拍摄的爱神星照片，它的外形像是一块被仔细啃过的肉骨头，最大直径34千米（光盘图4.5.1　433号小行星爱神星）。通过对小行星掩恒星的观测，人们还发现小行星居然也有卫星，如532号小行星大力神可能拥有4～5颗卫星，智神星、婚神星和爱神星也都拥有自己的卫星。“伽利略木星探测器”飞越小行星带时，拍到过243号小行星艾达及其卫星的照片（光盘图4.5.2　小行星艾达及其卫星），艾达表面布满撞击坑，小卫星距离艾达90千米，直径1.6×1.2千米。美国宇航局已于2007年9月27日发射“黎明号小行星探测器”，将于2011年到达灶神星、2015年到达谷神星上空，对这两个最大的小行星进行近距离探测。

表4.5.1　最大的小行星

正式编号	命　名	直径/千米	轨道半长径/天文单位	发现年份
1	Geres（谷神星）	932	2.77	1801
4	Vesta（灶神星）	525	2.36	1807
2	Pallas（智神星）	522	2.77	1802
10	Hygiea（健神星）	430	3.14	1849
511	Davida（戴维）	336	3.18	1903
704	Interamnia	334	3.06	1910
52	Europa（欧罗巴）	312	3.10	1858
65	Cybele（原神星）	308	3.43	—
451	Patientia（忍神星）	280	3.06	1899
15	Eunomia（司法星）	272	2.64	1851
87	Sylvia（林神星）	272	3.49	1866
31	Euphrosyne（丽神星）	270	3.15	—
3	Juno（婚神星）	265	2.64	1804
16	Psyche（灵神星）	264	2.92	1852
532	Herculina（大力神）	243	2.77	1904

关于小行星起源问题，有几种说法。一种说法认为，小行星是一颗大行星爆炸后形成的；一种说法认为小行星是大行星受到意外撞击后形成的；另一种说法认为在太阳系早期形成大行星的阶段，一颗尚未发育成熟而中途“流产”的大行星裂解后形成的。究竟如何，还难下结论。

探测和研究小行星，被认为有以下四方面的意义：①太阳系演化研究。因为小行星质量小，不论何种原因起源，内部热能早已丧失，没有能力改变自身的形态和物理特征，因而保存着太阳系早期历史的大量信息，是研究太阳系演化的太空标本。②宇航安全或宇航中间站。穿过小行星带的行星际航行，要避开小行星的撞击，必须预知它们的轨道；有些较大的小行星可考虑利用它的宇宙速度做搭载或做中间站停靠之用。③资源价值。有的小行星富含对人类有用而地球上稀少的矿物，可以考虑开采利用或拖回地球使用。美国《科学》周刊曾报道小行星1986 DA（永久编号6178），直径2.3千米，质量200亿吨，是一颗金属结构的小行星，估计含铁100亿吨，镍10亿吨，黄金1万吨，铂10万吨。④避开撞击地球的可能性。绝大多数小行星都在小行星带内绕太阳运行，不会和地球相撞。但也有少数特殊轨道的小行星，它们的轨道近日点深入到火星、地球、金星甚至水星轨道以内，称为“近地小行星”（图4.5.3）。它们在运行过程中可能与地球相撞或因太靠近地球而被地球的引力拉拽而坠向地球形成撞击事件。

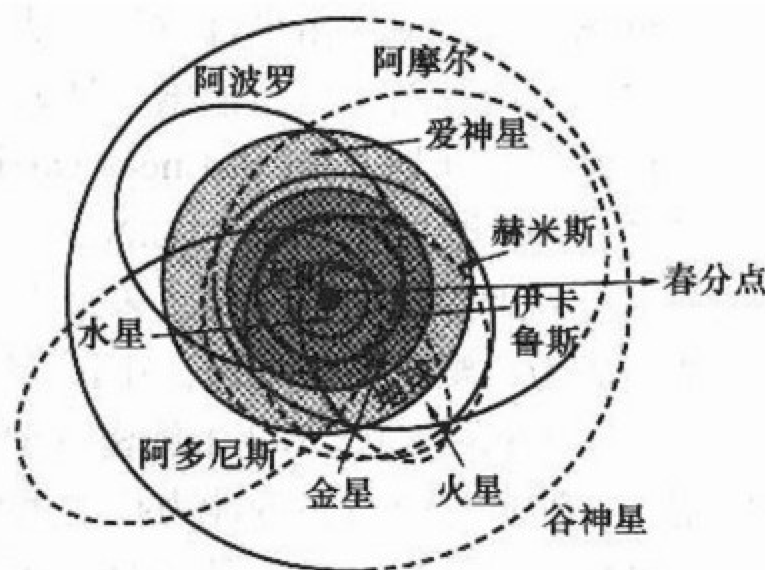


图4.5.3 一些近地小行星的轨道

20世纪70年代以来，包括古生物学家在内的科学界已经普遍接受一种说法：6 500万年之前，一颗直径约为10千米的小行星撞击地球，使生态系统发生重大灾变，导致统治地球生物界长达1.6亿年之久的恐龙家族在短时期内灭绝。20世纪90年代，由资源卫星探测到墨西哥南部海域有一个直径160～180千米的陨星坑。经海底蛙人取样分析，发现铱的含量反常，这是曾遭受小天体撞击的证据之一。地质钻探还找到了撞击时形成的玻璃陨石，经样品年龄测定，恰为距今6 500万年之前。最近发现，2.5亿年前二叠纪末期，那时地球上只有一块盘古大陆和一个超级盘古大洋，发生过一次直径8～11千米的小行星撞击事件，导致生物大灭绝，约90%的海洋和80%的陆地动植物从地球上消失。遗留的撞击坑位于现在的澳洲海岸附近的海洋中，直径约200千米（光盘图4.5.4 2.5亿年前小行星撞击地球）。科学家们认为这样激烈的撞击事件，概率大约是每1亿年发生一次，而直径1千米级的小行星撞击地球的概率为100万年一次，直径100米级的小行星撞击，概率为1万年一次。人类有文字以来的历史还不到1万年，

这期间没有遇到过严重的撞击事件。但小行星 1991 BA 离地球最近时 16.5 万千米；小行星 1994 XM1 则从 10.5 万千米处掠过地球，小行星 2004FH 离地球最近时只有 4.3 万千米。它们都进犯到月球轨道以内。1972 年 8 月 10 日，一颗直径约 10 米、质量几千吨的小行星，以每秒 15 千米的速度飞越美国和加拿大西部上空。不少人目击火球并耳闻隆隆的响声，是从 58 千米上空传来的。美国的空间红外探测器也记录了这一事件。如果撞上地球，将相当于 2 至 3 颗广岛原子弹爆炸的威力。小行星 2004 MN4，永久编号 99942，正式命名阿波菲斯（Apophis），直径约 320 米，2029 年离地球近至 3.4 万千米，预计 2036 年有可能撞击地球。虽然在已发现的 200 颗近地小行星中，再没有别的小行星会在未来两个世纪内与地球相撞，但 2 000 多颗直径 1 千米以上的近地小行星 90%尚未发现，它们与地球相撞的可能性是人类面临的巨大的潜在威胁。现代人类掌握的科学技术已经能够准确地计算出将要发生撞击的小行星轨道，可以提前采取人为措施使其轨道偏离，避免撞击事件发生。从 20 世纪 80 年代以来，以美国帕洛玛山天文台的“小行星和彗星巡天搜索”计划为代表的国际监测网正在形成，执行国际近地小行星研究计划（lincoln near earth asteroid research project，LINEAR）。从 1997 至 2008 年 9 月 18 日，LINEAR 已发现并获正式编号的小行星 97 466 颗，发现数量列世界排名第一位。未来 10 年之内，将监控所有＞100 米级的小行星，使地球成为一颗设防的星球。中国紫金山天文台建在江苏盱眙的观测基地，投资近 2 000 万元的 1.04/1.2 米施密特型“近地天体探测”望远镜已于 2007 年投入使用，监测近地小行星的能力排名世界第五位。未来 20 年内可发现 500～1 000 颗有可能给地球带来危害的近地小天体，其中直径 1 千米以上的有 50～100 颗（光盘图 4.5.5　紫金山天文台盱眙基地的施密特望远镜）。

2003 年 2 月，发现一颗完全在地球轨道以内的小行星 2003 CP20，直径 1～2 千米，绕日周期 235 天，轨道半径 0.98AU，尚属首例。

小行星是目前各类天体中唯一可以由发现者命名并得到国际公认的天体。国际天文学联合会下属的小行星中心（MPC）设在美国史密松天体物理台，专门负责小行星的编号、命名和其他与小行星有关的工作。小行星中心在接到发现新小行星的报告并初步确认之后，先给予一个国际统一格式的暂定编号：在年代后面跟两个拉丁字母和一位或两位数字，如 1996 TV1。小行星的轨道周期一般为 3～5 年，但对于地球而言的回归周期，即发生“冲”的周期通常只有一年多一点。获得暂定编号的小行星在经过至少 4 次回归周期的观测，轨道又能够非常精确地确定时，它将得到一个永久性的国际编号，发布在小行星中心的通报上。在通报发布后 10 年内，最早发现这颗小行星并算出轨道的发现者有权对这颗小行星命名，最后由国际天文学联合会确认并予以公布。中国人发现的第一颗小行星 1125 号，为前中国科学院紫金山天文台台长张钰哲先生于 1928 年在美国发现，

命名“CHINA”(中华)。1955年～1983年，紫金山天文台共发现并获得国际正式编号的小行星149颗，名列世界排名第52位。盱眙基地建成后，2007年～2008年已发现小行星452颗，其中获得国际正式编号的10颗。中国国家天文台（原北京天文台）1982年～2002年共发现并获得国际正式编号的小行星1 190颗，名列世界排名第14位。落成于2007年6月9日的山东大学威海天文台，用1米口径的反射望远镜发现一批小行星，其中一颗2008 YM9已获得永久编号207931，同时获得命名权。这是中国高校天文台获得永久编号的第一颗小行星。

现用（1925年以后）的小行星暂定编号规则是：前4位数字代表年份，后跟一位空格；第一个字母代表月份，每半个月换一个字母，A代表1月上半月(1-15日)，B代表1月下半月（16以后)，C代表2月上半月，D代表2月下半月等等，不用I和Z，共24个字母，代表24个半月；第二个字母代表发现顺序，不用I，共25个顺序；如25个顺序用完后，后面再跟上25被重复使用的次数。如1986 DA为1986年2月下半月发现的第一颗小行星；1994 XM1为1994年12月上半月发现的第37（1×25＋12）颗小行星；1996 TV3为1996年10月上半月发现的第96（3×25＋21）颗小行星；2003 HG20为2003年4月下半月发现的第507（20×25＋7）颗小行星。

1999年7月，国际天文学联合会的专门委员会在意大利都灵制定了近地小行星是否会对地球造成威胁的“小行星险级都灵标准”。那些肯定不会与地球遭遇的小行星称为0级小行星。有可能使地球遭受危险的小行星分为10个等级，其中1～7级有可能造成某种程度的威胁，8～10级肯定会对某个地区甚至整个地球造成灾难性的危害。截至目前，国际天文界还没有观测到达到或超过都灵1级的小行星，也就是说还没有发现任何在未来时期内会对地球造成威胁的小行星。

4.5.2 彗星

彗星拖着长长的尾巴，在古人眼里常被视做灾难的征兆。中国民间俗称为“扫帚星”，“彗”字即指扫帚。很多人把彗星的彗字写成智慧的“慧”，那是写错了。彗星是太阳系小天体，因为大多数彗星质量都很小，与小行星属同一量级。彗星一般沿着很长的椭圆形轨道绕太阳运动。其结构一般被认为是“冰冻团块模型”，由冰和尘埃、砂粒、石头混合组成，俗称“脏雪球”。直径约在几米到几十千米的范围。当彗星离太阳很远时（大于4个天文单位），脏雪球处于冻结状态，它是没有尾巴的，在大望远镜中呈现很暗的星点状，称为彗核。随着彗星接近太阳，到距离约3个天文单位时，表面部分开始融化、升华，形成朦胧的大气，包裹在彗核周围，称为彗发，仍没有尾巴。彗核与彗发合在一起称为彗头。离太阳更近时，彗发变大变亮，范围可达10^5～10^6千米。当彗星在离太阳约2个天文

单位时，开始出现彗尾。彗尾分为尘埃尾和离子尾两类。尘埃尾的主要成分是尘埃，大小为十分之几微米到上百微米，受太阳辐射压力的推斥作用，向与太阳相反的方向延伸，因反射阳光而发亮，偏黄色。因同时受轨道运动惯性力的影响，表现为弯曲的形状。离子尾由 CO，H_2O，OH，CN 等分子的离子组成，主要受太阳辐射压和太阳风的双重作用，压向背着太阳的一面，因气体的荧光辐射而发光，偏蓝绿色，比尘埃尾直。许多彗星同时呈现一直一弯两条尾巴。离太阳越近，彗尾越长、越亮，过近日点后又随着远离太阳，逐渐减小直到消失。大彗星尾巴最长时有上亿千米长，1842I 彗星的尾巴长 2 亿多千米，超过太阳到火星的距离。图 4.5.6 表示出彗尾消长的过程。

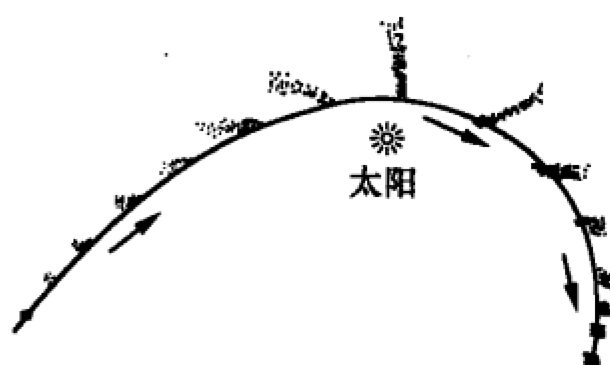


图 4.5.6 彗尾消长的过程

彗星绕日公转的轨道，可以根据天文定位观测算出。对椭圆轨道的彗星，如果周期短于 200 年，叫做短周期彗星；长于 200 年的叫做长周期彗星。如果轨道为抛物线或双曲线，它们出现一次以后就一去不复返了。彗星在轨道上运动，大部分时间是看不到的，只有在经过近日点前后，人们才能观测到。看到彗星有尾巴的时间更短，通常只有几天或几个月。只有很亮的彗星才能为肉眼所见，其余只能在望远镜中观测。所以对公众来说，彗星是较罕见的天象。

20 世纪 50 年代以来出现的大彗星有阿伦德-罗兰（Arend Roland）彗星 C/1956R1（光盘图 4.5.7 阿伦德-罗兰彗星 C/1956R1）、穆尔克斯（Mrkos）彗星 C/1957P1（光盘图 4.5.8 穆尔克斯彗星 C/1957P1）、池谷-关（Ikeya-Seki）彗星 C/1965S1（光盘图 4.5.9 池谷-关彗星 C/1965S1）、贝耐特（Bennett）彗星 C/1969Y1（光盘图 4.5.10 贝耐特彗星 C/1969Y1）、科胡特克（Kohoutek）彗星 C/1973E1（光盘图 4.5.11 科胡特克彗星 C/1973E1）、威斯特（West）彗星 C/1975V1（光盘图 4.5.12 威斯特彗星 C/1975V1）、海尔-波普（Hale-Bopp）彗星 C/1995O1（光盘图 4.5.13 海尔-波普彗星 C/1995O1）、百武（Hyakutake）彗星 C/1996B2（光盘图 4.5.14 百武彗星 C/1996B2）、麦克劳特（McNaught）彗星 C/2006P1（光盘图 4.5.15 麦克劳特彗星 C/2006P1）。彗星的国际编号 C/代表彗星，后面是发现的年代、月份（A、B 表示 1 月的上、下半月，C、D 表示 2 月的上、下半月，以下类推，跳过字母 I）和顺序。

目前每年用望远镜约看到 30 颗彗星，其中两三颗是新发现的。据统计，已有观测记载的彗星有 1 800 多颗，去掉重复出现的仅有 1 600 多颗。最负盛名的是哈雷彗星。哈雷（E. Halley）是与牛顿同时代的英国天文学家。1682 年，哈雷观测过这颗大彗星，1705 年他运用牛顿的力学理论计算出这颗彗星的轨道，同时指出 1531 年、1607 年两次出现的都是这同一颗彗星。他预言 1758 年，这

颗彗星将再次回归。那一年过去了，哈雷已经作古，彗星也不见归来。一些人开始嘲笑天文学家并怀疑牛顿力学的可靠性。这时，法国天文学家克莱罗（A. C. Clairaut）仔细计算了该彗星受到摄动的情况，宣告它应于1759年4月13日过近日点。1759年3月12日，这颗拖着长尾巴的彗星果然重视天际。为了纪念哈雷，人们将这颗彗星定名为哈雷彗星。哈雷彗星轨道的证实与87年之后海王星的发现，使牛顿力学体系大放异彩，确立了其无可辩驳的地位。

哈雷彗星的椭圆轨道近日点距离太阳0.59个天文单位，在金星轨道以内；远日点距离太阳35个天文单位，在海王星轨道以外，轨道周期75.98年。哈雷彗星的轨道见（光盘图4.5.28）。据历史考证，人类最早和人最完整的哈雷彗星记录在中国。第一次确切的记录是《春秋》一书所载："鲁文公十四年秋七月有星孛（音 bèi）人于北斗。"星孛是中国古人对彗星的称呼，鲁文公十四年即公元前613年。如果从最近一次哈雷彗星回归（1986年）起算，一1次在1910年（宣统二年，见光盘图4.5.16　1910年回归的哈雷彗星），一2次在1834年（道光十四年），可以追溯到一29次，即公元前240年，秦王政七年。在这期间哈雷彗星共30次回归，我国史书都有记载，连续不断。秦王政即嬴政，公元前221年统一中国后即始皇帝位，后称秦始皇。鲁文公十四年应是哈雷彗星一34次回归。从一33次到一30次，文献未见记载，但有人考证，《淮南子》一书所说"武王伐纣……彗星出"是公元前1057～前1056年的哈雷彗星一40次回归。

1986年2月哈雷彗星回归，引起世界各地天文学家和公众的兴趣（光盘图4.5.17　1986年回归的哈雷彗星）。虽然这次回归的观测条件不好，到达近日点时地球正在太阳的另一侧，距离彗星较远，远不如历史上的壮观。但在现代技术条件下，天文学家对它进行了详尽的观测。苏联、日本和欧洲共发射了5艘宇宙飞船穿越彗星大气，第一次取得了近距离观测彗星的资料。其中欧洲发射的乔托号宇宙飞船离彗核最近时只有600千米。观测发现，哈雷彗星的彗核不是球形，而是如光盘图4.5.18所示的形状（光盘图4.5.18 哈雷慧星的慧核），长15千米，横径8千米，表面高低不平，有几个直径约1千米的浅坑及丘、谷，覆盖着一层不均匀的暗尘，厚度从1厘米到几米，反照率仅2%～4%。估计彗核质量为1 000亿吨，平均密度0.1～0.3克/厘米^3，说明在冰-尘混合固体内部有许多气隙。从表面的一些活动区不断有大量尘埃喷流和CN和碳气体喷流，高度达1 000千米，比暗黑表面亮得多，组成范围很大的包层或晕。喷出的尘粒非常细碎，多为质量小于10^{-11}克的微尘，富含碳、氢、氧、氮、铁、硅、镁等元素。彗核的主要结构成分是水分子，占总质量的80%，证实了彗星的"冰冻团块模型"，而且含水量比人们估计的要大得多。还发现一些碳氢化合物及复杂的有机分子。彗核绕其自转轴有周期为7.4天的自转，同时自转轴又以77°夹角进动，周期为52小时（图4.5.19　哈雷彗星慧核的转动）。宇宙飞船还观测到，已经

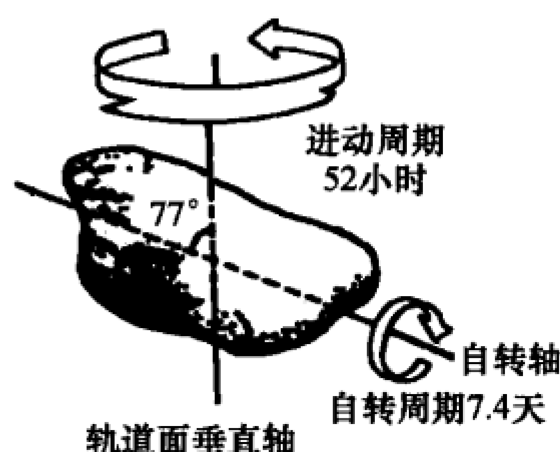


图 4.5.19　哈雷慧星慧核的转动

离去的哈雷彗星在离太阳 14.5 天文单位处，突然增亮了 200～300 倍，出现了直径约 30 万公里的模糊大气，估计这是受到了一次较大的意外撞击，可能会影响到 2061 年再次回归的日期。

恩克彗星是另一颗著名的彗星。它的回归周期是 3 年又 106 天，自 1786 年发现以来已观测了 60 多次。比拉彗星是 1772 年发现的，周期为 6.6 年，1846 年回归时一分为二，1852 年再次回归时发现两部分拉开了距离，1858 和 1865 年没有出现，1872 年 11 月 27 日，当地球穿过比拉彗星原来的轨道时，夜空中突然出现了一场壮观的流星雨，历经 4 个多小时。

1994 年 7 月 17～22 日，发生了一次人类有史以来所观测到的太阳系天体最大的撞击事件。一颗名为苏梅克-列维的彗星（SL-9）分裂成 21 块，连珠炮似地撞入木星大气层，速度达到每秒 60 千米，比炮弹的速度大 10 倍以上（光盘图 4.5.20　已分裂的彗星向木星撞去）。因受冲击而被加热的彗星物质，混合着来自木星大气的高温气体形成烟柱，高达 3 000 千米以上，散落物又坠入木星，在木星表面留下了 21 块黑色的疤痕。虽然所有的撞击都发生在背着地球的木星半球，从地球上不能直接观测到，但由于木星自转很快，大约十几分钟后，地面天文望远镜就能看到撞击现场的情形。第 7 块碎片撞击的伤疤在木星表面南纬 44°，直径达 2 万多千米，比整个地球还大。在望远镜里可以看到这块环形黑色疤痕，被称为木星上的“黑眼睛”，成为仅次于木星大红斑的第二个最显着的标志（光盘图 4.5.21　哈勃望远镜拍摄的木星挨撞后的疤痕）。第一块碎片撞击的时间是世界时 16 日 20 时 15 分，最后一块碎片撞击的时间是世界时 22 日 8 时。估计没有分裂前的彗星质量约 5 000 亿吨，直径大约 10 千米。21 次撞击的总能量相当于 40 万亿吨 TNT 炸药（40 万个氢弹）爆炸的能量，瞬间最高温度可能达到 3 万摄氏度。对于人类来说，观测这次撞击事件的意义不在撞击本身，而在于天文学家早在一年多以前就对事件做出了相当准确的预报，误差不到 20 分钟。那是根据对彗星的定位观测，准确计算出其运动轨道而作出的。

20 世纪末一次在广大公众中引发关注热潮的彗星是海尔-波普彗星。这是一颗长周期彗星，1995 年 7 月被发现，1997 年 4 月 1 日过近日点。当时距离太阳 7.1 个天文单位。它的轨道面倾角 89°26′，几乎与黄道面垂直，远日点 400 天文单位，比海王星远十多倍。太阳系内几乎全部行星、卫星都在离黄道面不远的扁平区域内，而海尔-波普彗星却在与黄道面垂直的遥远空间中运动，在它身上携带着这一未知领域的信息。开始出现时，根据定位观测计算其轨道周期约为 4 000 年，来到近日点附近时，再度根据定位观测计算其轨道周期变为 2 000 多

年。说明这颗彗星的运动轨道可能在一个周期之内就有较大的变化。据 1997 年 7 月美国《天空与望远镜》发表的约芒斯（D. K. Yeomans）的研究结果，这颗彗星上次过近日点的时间是公元前 2214 年前后，而下次回归约在公元 4377 年。这次回归时最大亮度为－0.8 星等，加之轨道运动速度很慢，在天空逗留了很长时间，所以，用肉眼即明显可见它的黄色尘埃尾和蓝色离子尾（光盘图 4.5.13）（光盘图 4.5.22 夜观海尔-波普彗星）。专业观测还发现彗核有周期为 11 小时的自转。一大天文奇观是海尔-波普彗星与日全食同现。1997 年 3 月 9 日北京时间 9 时 08 分，在中国黑龙江漠河地区发生日全食时，海尔-波普彗星同时出现在暗黑的天空背景上，与全食太阳相距 45°.2（参见 4.3.3 小节）。

1999 年 2 月 8 日，美国发射“星尘号”探测器，于 2004 年 1 月，在火星轨道之外，拍到相距 240 千米的怀尔德-2 彗星的彗核的照片（光盘图 4.5.23 “星尘号”探测器拍摄的怀尔德-2 彗星的核），并采集到彗发物质样品（光盘图 4.5.24 星尘号采集怀尔德-2 彗星的尘埃物质）。2006 年 1 月“星尘号”探测器的回收舱返回地球，实现了人类首次采集到彗星实物样品（光盘图 4.5.25 星尘号回收舱回到地球）。“星尘号”项目的副首席科学家、采集方案的设计者是美国华人科学家邹哲博士（光盘图 4.5.26 星尘号项目负责人邹哲博士）。2001 年 9 月，美国发射“深空一号”探测器（光盘图 4.5.27 “深空一号”探测器和波莱利彗星的核），在距地球 2.2 亿公里时深入波莱利彗星的彗发，拍回了彗核的照片。2005 年 1 月 12 日，美国“深度撞击”号探测器升空，7 月初到达坦普尔 1 号彗星附近（光盘图 4.5.28 坦普尔 1 号彗星的轨道）。在距离 80 万千米处，发射 372 千克重、电冰箱大小的铜质炮弹，以每秒 10 千米的速度，于 7 月 4 日世界时 5 时 52 分命中直径 6 千米的彗核，希望获取有关彗核深部及碎片的信息，同时检验人类主动向小天体“进犯”的能力（光盘图 4.5.29 深度撞击示意图）（光盘图 4.5.30 炮弹向彗核撞击；光盘图 4.5.31 深度撞击产生的光）。2004 年 3 月 2 日，欧洲空间局发射的罗塞塔探测器（光盘图 4.5.32 罗塞塔探测器、着陆器和彗星），将于 2014 年到达 67P/C-G 彗星附近，释放重约 100 千克的着陆器，实现人类首次在彗核表面的软着陆（光盘图 4.5.33 罗塞塔软着陆示意图）。

2002 年 2 月 1 日傍晚，中国河南开封市 32 岁的张大庆独立发现一颗新彗星，此前 1 小时日本（傍晚来临刚好比中国早 1 小时）的池谷熏也发现了，被正式命名为池谷-张彗星 C/2002C1。这是本世纪初最亮的肉眼可见彗星，也是中国业余天文学家第一个发现的彗星（光盘图 4.5.34 2002 年出现的池谷-张彗星）。2008 年 2 月 1 日，苏州的陈韬和乌鲁木齐的高兴共同发现了中国业余天文学家发现的第二颗彗星，被正式命名为陈-高彗星 C/2008C1。2007 年 7 月 11 日广州中山大学本科生叶泉志和台湾中央大学天文研究所鹿林天文台林启生合作发现一

颗新彗星，被正式命名为鹿林慧星 C/2007N3。慧星由叶泉志从照片中发现，而照片由林启生用鹿林天文台 41 厘米望远镜拍摄。

发现彗星的另一种方式是利用互联网上发布的天文观测图像，而不是用望远镜观察天空。1999 年开始至 2003 年底，从“太阳和太阳风层探测卫星”（SOHO）图像中已发现 SOHO 彗星 723 颗，其中 621 颗是业余爱好者发现的。光盘图 4.5.35（光盘图 4.5.35　SOHO-6 彗星）中太阳本体被圆盘遮盖，只露出白色的日冕，左下方是带尾巴的 SOHO-6 彗星。这些彗星都是近日点离太阳很近的“掠日彗星”，它们从远方长途跋涉而来，大多数成员在朝拜过太阳之后便勇敢地投入太阳的怀抱，葬身于火海之中。中国新疆阿拉山口气象站的周兴明业余发现 SOHO 彗星 64 颗，排名世界第四位。2004 年 8 月，周兴明不幸遭车祸遇难，年仅 39 岁。

4.5.3　海外天体

海外天体系指海王星轨道以外的天体，简称 TNO，是 trans-neptunian object 的缩写。根据国际天文学联合会 2006 年 8 月所作的决议：“（3）其他所有围绕太阳运动的天体被定义成‘太阳系小天体’（small solar system bodies）。注 3：目前这些天体包括绝大多数的太阳系小行星、绝大多数的海外天体、彗星和其他小天体。”列为太阳系小天体的“绝大多数”以外的 TNO 应指冥王星、查龙、赛德娜、2003UB313 等较大的 TNO，被称为“矮行星”的天体。根据决议“注 2：IAU 将建立一个程序对接近‘矮行星’和其他分类边界的天体进行评估。”矮行星还应包括小行星中体积特别大的成员如谷神星等。

冥王星曾是太阳系九大行星中的一员，到太阳的平均距离比海王星远 15 亿千米，绕太阳公转的周期是 248 年。1978 年发现冥王星有一颗卫星，取名查龙，质量 1.77×10^{21} 千克（冥王星质量的 1/7.3），直径 1 190 千米（冥王星直径的 1/2），两者相距 1.9 万千米，绕转周期 6.387 天。按照行星的新定义，查龙也许不能算冥王星的卫星（详见 4.1 节），2005 年由哈勃望远镜发现两个真正的冥卫与查龙一起构成冥王星一家四口（光盘图 4.1.1）。特别有趣的是查龙的自转周期、公转周期与冥王星的自转周期都是 6.387 天。4.4 节说过，地球的定点同步通信卫星在地球赤道上空 36 000 千米处，它的公转轨道与地球赤道面共面，轨道周期与地球自转周期相同，同时为了发射和接收信号方便，需要始终以同一面对着地球，因此卫星也必须保持以同一周期自转。查龙的公转周期、查龙和冥王星的自转周期完全符合这些条件。但它们是否互为天然定点同步卫星，要看查龙的公转轨道、查龙与冥王星的赤道，三者是否共面，现在还不能确知（参见 2.6 节）。美国宇航局已于 2006 年 1 月 19 日发射“新视野号”冥王星探测器，将于 2015 年到达冥王星。届时传来的信息将揭开冥王星更多的细节和谜团。”

50年前，美籍荷兰天文学家柯伊伯（G. P. Kuiper）提出一种见解，认为在冥王星轨道两侧，宽约30亿千米的环状区域里，有10亿～100亿颗以冰为主要成分的小天体绕太阳公转，称为柯伊伯带天体。其中极个别的成员，沿着狭长的椭圆轨道或抛物线轨道，来到太阳和地球附近，成为引人注目的彗星。著名的哈雷彗星就是其中之一。

20世纪的最后10年，柯伊伯的见解得到天文观测的证实。1992年发现第一颗柯伊伯带天体，到2005年5月10日，已发现867颗；到2008年7月30日增加到983颗。估计直径大于100千米的柯伊伯带天体有10万颗，大于10千米的有2亿颗。2002年6月发现的夸阿（Quaoar），或翻译为“创神星”，国际小行星编号50000，直径1 200千米；2004年2月17日发现的2004DW，国际小行星编号90482，命名奥尔库斯（Orcus），直径1 600千米，都比冥卫查龙还大。2005年7月，又发现3颗直径大于1000千米的柯伊伯带天体：2003EL61，2003UB313和2005FY9。其中2003UB313的直径比冥王星还大。它的轨道半长径67.661天文单位，偏心率0.442，倾角44.°2，离太阳最近时37.75天文单位，最远时97.57天文单位，是一颗典型的柯伊伯带天体。2006年9月国际小天体提名委员会命名其为“爱丽丝”（Eris）或翻译为“阋（音xi）神星”。它还拥有一颗卫星，直径250千米，命名“黛斯诺米亚”（Dysnomia）。光盘图4.5.36是爱丽丝及其卫星示意图（光盘图4.5.36 爱丽丝及其卫星示意图）。2005年1月，发现2003EL61拥有两颗卫星。光盘图4.5.37是夏威夷的凯克望远镜拍摄的照片（光盘图4.5.37 2003EL61及其卫星）。国际小天体提名委员会命名2003EL61为浩米亚（Haumea），两颗小卫星为西亚卡（Hi'iaka）和纳玛卡（Namaka）。光盘图4.5.37中间是浩米亚，其下稍亮的是西亚卡，右上很暗的是纳玛卡。浩米亚似乎具有橄榄球一样的形状，光盘图4.5.38是它的示意图（光盘图4.5.38 浩米亚及其卫星示意图）。2005FY9被命名为“马克马克”（Makemake）或翻译为“鸟神星”。冥王星、查龙、爱丽丝、浩米亚和马克马克都已被归入矮行星的行列。它们的国际小行星编号分别是：134340、134340Ⅰ、136199、136108和136472。光盘图4.5.39示意了包括冥王星在内的前十名柯伊伯带天体的大小（光盘图4.5.39 前十名柯伊伯带天体）。

除冥王星、爱丽丝和浩米亚之外，还发现7颗柯伊伯带天体拥有卫星，它们是1997CQ29、1998SM165、1998WW31、1999TC36、2000CF105、2001QT297、2001QW322。卫星与主星质量差别不大，特别是1997CQ29、1998WW31和2001QW322，两者几乎相等，应看作双柯伊伯带天体。光盘图4.5.40是哈勃望远镜拍下的双柯伊伯带天体1998WW31的运行图像（光盘图4.5.40 双柯伊伯带天体1998WW31的运行图像）。估计可能有10%的柯伊伯带天体拥有卫星。

2004 年 3 月，美国天文学家发现一个远在 90 天文单位处的小天体，亮度 20.5 等，相当于 8 000 千米外的一支烛光，直径约为冥王星的 3/4，取名“赛德娜”，国际小行星编号 90377。光盘图 4.5.41 是赛德娜的轨道示意图（光盘图 4.5.41　赛德娜的轨道示意图）：远日点 884 天文单位，近日点 76 个天文单位，公转周期 10 500 年，2076 年过近日点。图中右上是赛德娜被发现时的位置，左上是木星轨道以内小行星带和几颗内行星，右下是赛德娜的轨道，左下是赛德娜在奥尔特彗星云中的位置。新闻媒体曾经炒作赛德娜是第 10 颗大行星，其实赛德娜连柯伊伯带天体都算不上，因为它的轨道近日点都在柯伊伯带范围之外。有人提出可能存在“内奥尔特彗星云”，赛德娜是其中第一个被发现的天体。或许奥尔特彗星云内边界比原来估计的要宽广得多。

台湾与美国合作的台-美掩星巡天计划（Taiwan-America occultation survey, TAOS）在玉山鹿林观测站用 4 台口径 50 厘米 3 度视场的望远镜，自动监测柯伊伯带天体掩食背景恒星，以发现柯伊伯带天体并测量其大小，但 4 年来没有达到预期目的，可能伊伯带天体的数量不如预期的那么多。

4.5.4　流星和陨石

流星像笔直的闪电，寂静无声，划破群星灿烂的夜空。那不是遥远的星星在流动，而是地球大气层中转眼即逝的光痕。流星是太阳系中非常细小的天体，与地球遭遇，被地球引力吸入大气层，在高速运动中摩擦燃烧，周围大气分子也受激而发光的现象。亮流星的亮度会超过天上最亮的恒星和行星。如果特别亮，途中还有分裂出来的溅落物质，便称为火流星。亮的火流星可以照出地面景物的影子。极个别更大的途中没有来得及全部烧毁而坠落地面，成为陨石。太阳系中这些非常细小的天体称为流星体。

流星体广泛散布于太阳系各大行星之间，也绕太阳运行，质量从 100 吨到百万分之一克。大的流星体和小的小行星之间已没有严格界限。绝大多数流星体是细小的砂粒或尘埃，也叫宇宙尘、行星际尘。它们主要来源于被太阳和大行星引力撕碎的彗星、小行星，少量来自月球、火星和其他大行星的卫星因受撞击而散落的碎屑。单个、偶然出现的流星称为偶发流星，没有一定的时间和方位，差不多每夜都有。通常在后半夜看到流星的机会要比前半夜多，就像在雨中快跑的人，前胸淋湿的程度要大于后背一样。处在后半夜的 1/4 地球表面，恰为地球公转运动的“前胸”；而处在前半夜的 1/4 地球表面，则是地球的“后背”。从星空中某一辐射点向四周大量迸发出现的称为流星雨，少则每小时数十颗，多到数十万颗，通常有固定的周期和方位，以辐射点所在的星座命名。数量多、规模大的流星雨称为流星暴，一般界定达到每小时 200 颗以上的称为强流星雨，每小时

400 颗以上的称为流星暴。狮子座流星雨是非常出名的流星雨之一，历史上多次形成流星暴。

狮子座是黄道十三星座之一，外形像一头雄狮，前爪处有一颗亮星中国古代名为轩辕十四，是著名的航海亮星之一。流星雨辐射点在雄狮颈部 γ 星与 ζ 星之间。狮子座流星雨来源于一颗名为坦普尔-塔特尔的彗星。这颗彗星是 1866 年发现的，编号 1866I，每 33.2 年绕太阳一周，轨道倾角 162°，每年 11 月 17 或 18 日，地球通过离彗星轨道最近点，而彗星每隔 33.2 年也在同一日期前后通过轨道上的离地球最近点，而且两个天体几乎是迎面相遇（图 4.5.42）。在太阳光照作用下，彗星有大量散落物喷发出来，散布在彗星周围相当广大的区域内。地球通过时，虽然没有撞着彗星（二者轨道没有实际交点，只有最近点），但同其周围的大量散落物遭遇，这些细砂和尘埃物质纷纷沿着相互平行的路线在地球大气中溅落，形成壮观的流星雨。由于投影、透视的缘故，看起来像是从天空某一点辐射出来的。

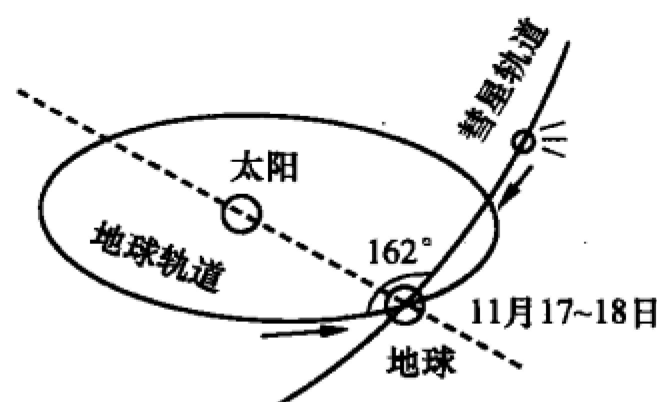


图 4.5.42 坦普尔-塔特尔彗星轨道

在 1866 年发现彗星之前，狮子座流星雨已被人们看到。中国古代文献中有过多次记录。1799 年、1833 年、1866 年这几年都有很壮观的表现。据 1833 年美国波士顿的目击者报告，流星雨像从天空一点飘落的大雪，纷纷扬扬，每小时有三四万颗（光盘图 4.5.43 1833 年狮子座流星暴雨的图画）。以后两个周期 1899、1933 年数量不多，但 1966 年又有壮观表现，最多时每分钟 2 400 多颗（光盘图 4.5.44 1966 年狮子座流星雨照片）。流星专家们本来预报，1988 年 11 月 18 日北京时间凌晨 2～4 时，狮子座流星雨将有壮观表现，而且最佳观测地点在亚洲东部。中国各地有众多爱好者彻夜守候着，也有西欧和美国的专业人员和爱好者来到中国，准备一饱眼福。遗憾的是，预报时间不准，这次流星雨竟提前 14 小时洒落天际，由于地球自转，最佳观测地区也由亚洲东部转移到了西欧和大西洋一带。不巧当时西欧大面积天气不佳，公众也毫无准备，只有地中海北岸的西班牙卡拉阿尔托天文台观测到此次流星雨峰值，持续 4 小时共 1 000 多颗，平均每小时 250 颗。远远不及 1966 年的规模，也比此次预报的每小时 5 000 颗少很多。原因可能是母体彗星回归的时间与地球到达轨道最近点的时间相距太远，散落的流星体密度分布又很不均匀，以致地球穿过的是比较稀疏的流星体群落。从峰值数量上看仍达到强流星雨水准，但在中国各地公众看到的最多为每小时 20～30 颗，只是一次规模较小的流星雨。以后几年狮子座流星雨都有持续表现，2001 年达到高潮，11 月 19 日北京时间凌晨 2 时前后，流星计数为每小时 3 400 颗。

流星和流星雨在我国古代文献中有丰富的记录。早在《春秋左氏传》中，即有“鲁庄公七年夏四月辛卯（公元前687年3月23日）夜，恒星不见夜中星陨如雨”的记载。古书《竹书纪年》还有更早的流星雨记录：“夏帝癸十五年，夜中星陨如雨。”据专家考证，至清末止，我国的流星雨记录有400多次，陨石降落地面的记录500多次。在《史记·天官书》中即有“星坠至地，则石也”的记述。北宋沈括的名著《梦溪笔谈》中有一段非常生动的描写：“治平元年，常州日禺时，天有大声如雷，乃一大星几如月，见于东南；少时又震一声，移着西南；又一震而坠在宜兴县民许氏园中，远近皆见，火光赫然照天，许氏藩篱皆为所焚。是时火息，视地中只有一窍，如杯大，极深。下视之，星在其中，荧荧然，良久渐暗，尚热不可近。久又久之，发其窍，深三尺余，乃得一圆石，犹热，其大如拳，一头微锐，色如铁，重亦如之。州守郑伸得之，送润州金山寺，至今匣藏，游人到则发现。”这段描写对陨石下落时的情况、温度变化、挖掘过程和收藏地点都做了详尽的记述。

1976年3月8日下午3时许，中国吉林省吉林市北部降落下一次规模很大的陨石雨，在约500千米^{2}区域共落下总重2 700千克以上的陨石碎块（光盘图4.5.45　吉林陨石雨陨石分布图），最大的一块吉林一号重1 770千克（光盘图4.5.46　吉林一号陨石），深入地下6米，地面坑径2米多，震起的土浪高达数十米，土块飞溅到百米之外，还升起了一个高达50多米的蘑菇云状烟柱。成千上万人目睹了陨石雨降落的奇观。

陨石按金属和硅酸盐含量分为三种类型：石陨石、铁陨石和石铁陨石。最大的石陨石是中国吉林一号陨石。最大的铁陨石是非洲纳米比亚的霍巴陨铁，重约60吨，其次是格陵兰冰层中找到的约克角陨铁，重约57吨，第三位是中国新疆陨铁，重约30吨，现存放在乌鲁木齐市新疆展览馆院中（光盘图4.5.47　中国新疆陨铁）。另外还有一种陨石为玻璃陨石，是一种天然玻璃体，大小不一，从1毫米以下至10～20厘米，不透明或半透明。因曾在中国雷州半岛发现，又被误会为是遭雷击以后形成的，所以又叫雷公墨。更加细碎的流星体或陨石称为微陨石或宇宙尘。质量在1毫克以下，大小在几十微米以下的宇宙尘进入高空大气时受阻尼而减速，受热程度减小，其温度达不到熔点，不会烧蚀，成为原样的宇宙尘慢慢飘落下来，而较大的宇宙尘在穿过大气时发生烧蚀，原貌已经改变。有人估计每年陨落到地球上的宇宙尘总量约15 700吨。在中国天津蓟县山区的中上元古界地质剖面中，发掘出一些夹在岩层中的宇宙尘，用电子显微镜可以观察到它也有壳、幔、核等类似一颗小行星的完整的分层结构。

除宇宙尘之外，还有来自太阳的微粒辐射（太阳风），从行星大气层逸散出来的气体和从彗星、卫星散发出来的气体弥散在广大的行星际空间。在地面上看到的黄道光现象就是这种宇宙尘和星际气体产生的。北半球低纬地区，在远离城

市的山上，每年的二月到四月傍晚，如果天气十分晴朗，在西方天空可以看到一条锥形的光带，上窄下宽，中线沿着黄道，亮度与银河相仿，这就是黄道光。夏末和初秋的黎明前，在东方天空中也可以看到黄道光。因为这时同冬春之交一样，黄道与地平线交角接近 90°。海拔越高，纬度越低，黄道光越显著，可能延伸到离太阳角距很远的地方。黄道光主要是由一个以太阳为中心、以黄道面为对称面的透镜状宇宙尘和星际气体云散射太阳光形成的。

陨冰也是陨石的一种类型，主要来自彗星的散落物，因陨落后很快化解，只有极少数偶然被人发现。我国江苏无锡地区自 1982 年以来已发现 4 起陨冰事件。在内蒙古鄂尔多斯、宁夏吴忠县、甘肃华池县、莫斯科市郊、美国威斯康星州都有过发现陨冰的记录。

陨石撞击地面形成陨击坑。利用空间遥感技术已发现 100 多个大型陨击坑。最著名的是位于美国亚利桑那州的巴林格陨击坑。坑径约 1 240 米，深 180 米，坑沿比附近平地高出 40 米左右，估计是 2 万年前陨击形成的（光盘图 4.5.48 美国亚利桑那州的巴林格陨击坑）。在加拿大马尼科甘有一个直径 65 千米的大型陨击坑，坑底覆盖着由撞击热产生的熔岩层，厚约 200 米，中心处还有一山形突起，很像月球上的环形山构造，估计陨击年代在 2.1 亿年之前。加拿大另一处萨德伯里盆地，也被认为可能是 17 亿年前陨击形成的。

中国地球科学家通过遥感或航测地图，也提出了几处可能存在的大型陨击坑。一处在广东始兴县境内，坑径 3.2 千米，深 250 米，坑底显露出撞击形成的放射形痕迹，坑周围有典型的岩石被冲击的变质现象。另一处在河北与内蒙古交界的多伦地区，有两层环形构造，内环直径 70 千米，外环直径 190 千米。还有吉林九台市上河湾、广东阳春、河北涿鹿和山东栖霞县唐家泊等地都发现可能的陨击坑。还有人提出香港维多利亚湾和太湖也可能是陨击造成的，并取得了一些地质考察的证据。然而也有相反的看法和理由。目前发现世界上最大的陨击坑卧在南极的冰原之下，直径 240 千米，深 800 米，估计是六七十万年前一颗 130 亿吨重的陨石撞击形成的。



第5章　恒　　星

迢迢牵牛星，皎皎河汉女。

盈盈一水间，脉脉不得语。

——东汉《古诗十九首》

恒星具有相当稳定的质量，太阳的质量为

2 000 000 000 000 000 000 000 000 000 吨

我知道你们不会介意多或者少一两个零，可大自然在乎。

——爱丁顿，《恒星与原子》

5.1　恒星物理方法

5.1.1　电磁波谱和天文大气窗口

天文学家研究恒星，最主要的信息源是来自恒星的电磁波辐射。现代空间飞行器能够采集带回地球进行分析研究的天体物质样品只限于月亮和彗星等太阳系小天体，不远的将来也许能扩大到火星、金星等太阳系天体。抵达其他恒星附近并采集样品回来，哪怕是最近的恒星，凭人类现有的技术能力也是完全不可能实现的。除电磁波辐射以外，还存在一些其他的信息源，诸如来自恒星或恒星际空间的宇宙线高能粒子、引力波等。但前者数量非常少，也很难捕捉，信息量极其有限；后者尚在努力探索之中，只找到一些表明其存在的蛛丝马迹，远没有达到能提供任何信息的程度。所以迄今为止，可以说电磁波辐射仍是获取恒星（除太阳外）物理信息的唯一信道。

电磁波是原子中的电荷做变速运动时产生的。恒星有极高的温度，有大量激烈运动着的电离了的原子，发出非常强大的电磁波辐射。波长范围从最长的无线电超长波到最短的 γ 射线。物理学告诉我们，无线电波、光波、X 射线、γ 射线都是电磁波，它们在本质上是相同的，仅在波长、频率和光子能量方面有所差别。波长不同的电磁波在真空中的传播速度都是一样的，而且与波源相对于接收器是否运动无关。波长 λ 和频率 ν 之间满足公式

$$\lambda\nu = c \quad (c\text{ 是传播速度})$$

因此不同波长的电磁波在真空中对应于不同的频率，波长愈短，频率愈高。电磁波既具有粒子性，也具有波动性。近代物理研究证明：不同波长的电磁波在特性

方面的差异起因于其粒子性和波动性的相互消长。波长愈短的，粒子性愈强，波动性愈弱；波长愈长的，波动性愈强，粒子性愈弱。所谓粒子性是电磁波所携带的许许多多被称为光子的小粒子的行为表现。不同波长的电磁波，其光子所具有的能量是不同的。光子的能量 E 与波长 λ 的关系为

$$E=\frac{hc}{\lambda}$$

式中，c 是传播速度，$h=6.626\times10^{-34}$ 焦耳·秒，称为普朗克常量。波长愈短，光子能量愈高。

依物理学中的做法，将电磁波按波长或频率的次序排列起来，称为电磁波谱。电磁波谱中各段的名称和波长范围如下：

波长在 1 毫米以上的电磁波为无线电波段。其中波长大于 10 千米的称超长波，1～10 千米的称长波，100 米～1 千米（频率 535～1 605 千赫）的称中波，10～100 米（频率 2～24 兆赫）的称短波，1 毫米～10 米的称微波。在天文学中，天体发出的无线电波又叫射电波。

波长从 10 纳米～1 毫米（1 纳米＝10^{-6}毫米＝10^{-3}微米）的电磁波为光学波段。其中 0.76 微米～1 毫米的称红外线，0.4～0.76 微米的称可见光，10 纳米～0.4 微米的称紫外线。

波长在 0.001～10 纳米的电磁波为 X 射线波段。其中 0.1～10 纳米的称软 X 射线，0.001～0.1 纳米的称硬 X 射线。

波长短于 0.001 纳米的电磁波为 γ 射线波段。

在恒星辐射的全部波段中，可见光只占很窄的一段，但却是非常重要的一段，是迄今为止人类获得天体信息最多的一段。可见光按红、橙、黄、绿、青、蓝、紫的顺序排列；红光波长最长，紫光波长最短。

恒星以及其他天体的辐射穿过地球大气层时，很多波段都被大气分子吸收掉了。也就是说，对于地面上的生物体以及人类的天文观测设备，来自天体的辐射很大一部分为大气层所屏蔽。屏蔽紫外线、X 射线、γ 射线的主要是大气中的臭氧层和氧原子、氧分子、氮原子、氮分子；屏蔽一部分红外线的主要是大气中的水分子和二氧化碳分子。这种屏蔽作用是地球上生物体的生命保障之一。没有这种屏蔽，生命会受到威胁，也就不可能有人类来研究天文学；但对天文观测来说，这种屏蔽却是获得天体信息的一种妨碍。幸好地球大气层对电磁波辐射留下了两处透明的窗口：光学窗口和无线电窗口，为人类天文学的发展提供了必要的信息通道。其中光学窗口也是地球上生物体的生命保障窗口，如果没有这个窗口，太阳光也被屏蔽在外，生命也就不复存在了。

光学窗口是波长在 0.35～22 微米的光学波段，包含全部可见光和一部分红外线。其中 17～22 微米是半透明窗口，即辐射的一部分可以透过；1.1～17 微

米是间断性窗口，即有若干个小缝隙辐射能够通过。波长比 0.35 微米更短的紫外线，大于 0.2 微米的能透过距地面 50 千米以上的大气层；0.1～0.2 微米的能透过距地面 100 千米以上的大气层。无线电窗口是波长在 1 毫米～30 米的无线电波段。其中 1～40 毫米的一部分微波也是半透明窗口。图 5.1.1 示意了电磁波谱和各波段的大气相对透明度。图中表示不同波段的电磁波被大气层屏蔽的程度。

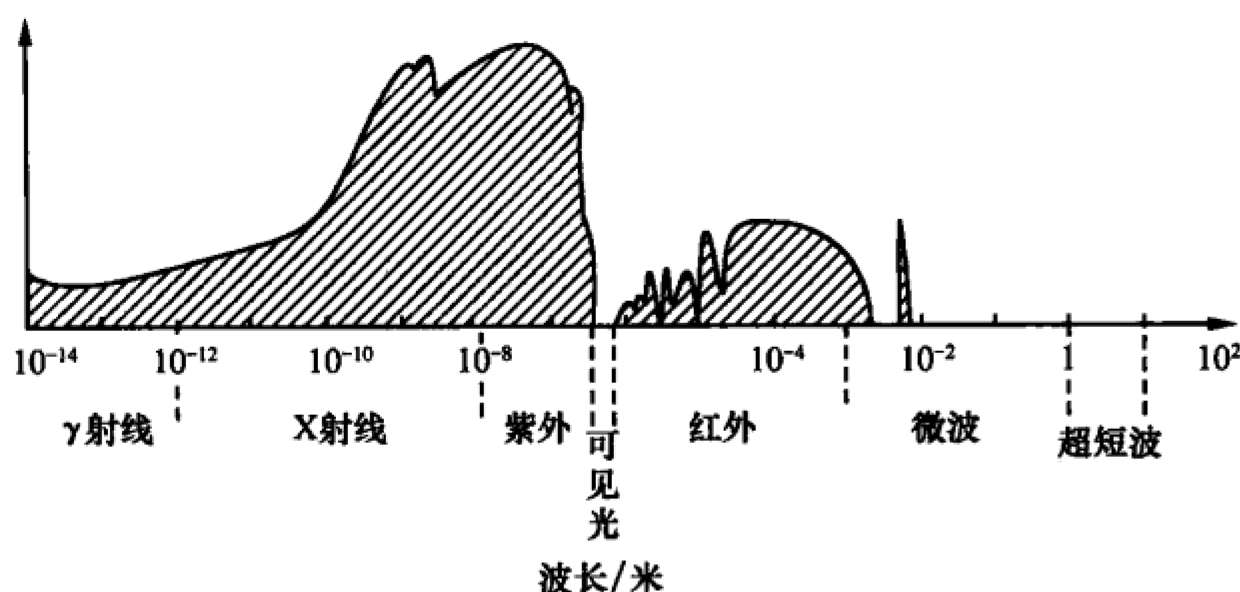


图 5.1.1　电磁波谱和大气相对透明度

不同波长的电磁波也可以用频率来表示，换算公式为

$$频率\ \nu = \frac{3\times10^{14}}{\lambda}$$

$$波长\ \lambda = \frac{3\times10^{14}}{\nu}$$

式中，ν 的单位是赫兹，λ 的单位是微米。如波长 $\lambda=0.5$ 微米的可见光，其频率为

$$\nu = \frac{3\times10^{14}}{0.5}\ 赫 = 6\times10^{14}\ 赫$$

或频率 $\nu=6\times10^{14}$ 赫的光，其波长为

$$\lambda = \frac{3\times10^{14}}{6\times10^{14}}\ 微米 = 0.5\ 微米$$

由于波长和光子能量之间有固定的关系，电磁波谱有时也用光子能量来描述。光子能量的单位常用电子伏特（eV）来表示。电子伏特是一个电子通过 1 伏特电位差时获得的能量，1 电子伏特$=1.602\,2\times10^{-19}$焦耳。波长越短，光子能量越大。将波长 λ 换算为光子能量 E 的公式为

$$E = \frac{1.24}{\lambda}$$

式中，E 的单位是电子伏特，λ 的单位是微米。如波长 0.01 纳米的硬 X 射线，用光子能量来表示，应为

$$E=\frac{1.24}{0.01\times10^{-3}}\text{ 电子伏特}=1.24\times10^{5}\text{ 电子伏特}$$

依习惯，在无线电波段常用频率来描述；在光学波段常用波长来描述；在 X 射线和 γ 射线波段常用光子能量来描述。其实，这三种描述是等价的。

5.1.2 恒星的亮度、星等、光度

恒星的亮度定义为在观测点与视线垂直的平面上，星光产生的照度。照度是一个物理量，含义是“被照亮的程度”单位叫勒克斯（lx）。在国际单位制系统（SI）中有 7 个基本单位，发光强度单位坎德拉（cd）是其中之一。根据 1979 年第 16 届国际计量大会的决议，坎德拉的定义是：辐射强度为每球面度 1/683 瓦，频率为 540×10^{12} 赫兹（λ=560 纳米，绿色）的单色光源的发光强度。球面度是立体角的单位，类似于平面角的弧度，是一个没有量纲的单位。对一个点而言，整个平面的平面角是 2π 弧度，整个空间的立体角是 4π 球面度。1 坎德拉发光强度的光源，如果向各个方向都发同样强度的光，其总的辐射功率为 $4\pi/683$ 瓦＝0.018 4 瓦，即每秒钟辐射出 0.018 4 焦耳的能量。这一光源在 1 球面度内的光通量定义为 1 流明；而 1 流明的光通量均匀分布在一个平方米的面积上，所获得的照度定义为 1 勒克斯。1 坎德拉的光源在距离 1 米处的整个球面（面积为 4π 米^2）上的光通量为 4π 流明，所以球面上的照度＝4π 流明/4π 米^2＝1 勒克斯。坎德拉的历史前身是标准烛光，所以 1 勒克斯相当于 1 支标准蜡烛在距离 1 米处所产生的照度。光源的发光强度越强，照度越大；距离光源越远，照度越小。书桌上的照度以 30～100 勒克斯为宜，即距离 1 米远处有 30～100 支蜡烛来照明，过大或过小会对视力产生伤害。

恒星距离遥远，星光传到地球上，照度非常微弱。所以恒星的亮度虽以照度为定义，却不用勒克斯单位来描述。天文学上沿用古希腊人的做法，用星等来表示恒星的亮度。古希腊天文学家喜帕恰斯把全天肉眼可见的恒星分成 6 个等级，最亮的星称为 1 等星，稍暗的为 2 等、3 等，肉眼勉强可以看见的为 6 等星。由于人眼的生理特性，对亮度强弱的感受如同人耳对声音强弱的感受一样，服从对数规律，即服从公式

$$m=\alpha\lg E$$

式中，m 是生理感觉的强弱程度，E 是实际的亮度，α 为比例常数，lg 表示 10 进对数。用现代方法测量的结果，1 等星比 6 等星的实际亮度刚好大 100 倍，所以求得 $\alpha=-2.5$，于是就建立了星等数 m 与亮度 E 的换算公式为

$$m=-2.5\lg E$$

当 $m=0$ 时，$E=1$，即 0 等星的亮度为 1，天文学上就把 0 等星的亮度作为恒星亮度的单位。

星光穿过大气层，会受到大气分子、原子的吸收和散射而使强度减弱，称为大气消光。处在不同地平高度的恒星，星光穿过大气层的厚度不同，再加上大气密度的变化，大气消光的程度差异很大。星等数的确定应以改正过大气消光的星的亮度，即地球大气外的恒星亮度为依据。为了将星光产生的照度与用星等数表示的恒星亮度相联系，规定 0 等星在地球大气外的照度为 $E_0=2.54\times10^{-6}$ 勒克斯。于是，星等数为 m 的恒星在大气外产生的照度为

$$E = E_0 10^{-0.4m} \text{ 勒克斯}$$

星等数越小，星越亮。如天狼星的星等是－1.45，北极星的星等是＋2.12，太阳的星等是－26.74；它们在大气外产生的照度分别是：天狼星 9.66×10^{-6} 勒克斯，北极星 0.36×10^{-6} 勒克斯，太阳 1.26×10^{5} 勒克斯。设两颗星的星等差 $\Delta m=m_1-m_2$，则它们的亮度比为

$$\frac{E_2}{E_1} = 10^{0.4\times\Delta m} = \sqrt[5]{10^{2\Delta m}}$$

例如，天狼星与北极星的星等差 $\Delta m=3.57$，计算其亮度比为 $\sqrt[5]{10^{2\Delta m}}\approx27$，即天狼星比北极星亮 27 倍。星等数的获得，是先用天文仪器测定星的亮度，然后通过星等与亮度的换算公式计算出来。相差 1 个星等，星的亮度提高 100 开 5 次方倍，即 2.512 倍。相差 5 个星等，亮度提高不是 5 乘 2.512 倍，而是 2.512 的 5 次方，刚好等于 100 倍。0 等星比 5 等星亮 100 倍；10 等星比 15 等星亮 100 倍，以此类推。织女星比北极星亮 2.09 星等，实际亮度相差 2.512 的 2.09 次方，约 7 倍左右。大望远镜能“看”到 28 等星，比人眼多看 21.5 个星等，“眼力”相差 2.512 的 21.5 次方，约为 4 亿倍。除望远镜“眼力”增强之外，还因为专业天文望远镜收录光波的是照相底片或电子设备而不是人眼。人眼的视觉暂存效应，只能维持 1/24 秒，时间一到，视网膜上的画面就会更新，所以延长看的时间并不能提高视力。而望远镜加上照相底片或电子设备能长达几小时地“观察”同一天体，视力就更大地提高了。

直接用肉眼感觉到或用仪器测出来的恒星亮度称为视亮度，其星等称为视星等。视星等并不代表恒星的真实亮度，原因是恒星的距离远近不同，差别很大。离得近的看起来很亮，其真实亮度可能低于那些看起来虽暗但距离更远的星。如果扣除距离因素，把所有恒星都放在同一距离处来衡量其亮度，才是恒星的真实亮度。天文学上约定这一个标准距离为 10 秒差距。秒差距是一个便于理论计算的距离单位，约等于 3.26 光年。秒差距的概念来源于恒星视差。天文学上定义从恒星的位置上看地球公转轨道长半径所张的角度 ρ'' 称为该恒星的周年视差，简称视差（图 5.1.2）。恒星距

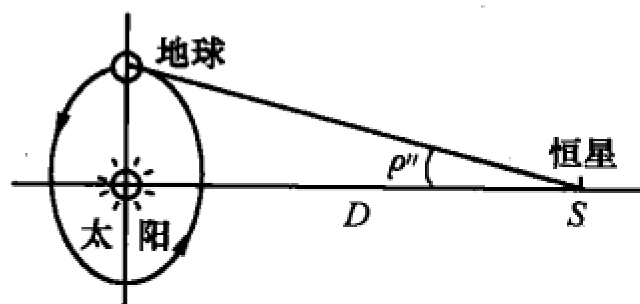


图 5.1.2　周年视差

离越远，视差值越小。视差常以角秒为单位，视差 ρ''与恒星至太阳的距离 D 之间有换算关系为

$$\rho'' = 206\,265\,\frac{\mathrm{AU}}{D}$$

式中，AU 是天文单位距离，206 265 是一个弧度相当的角秒数。秒差距就定义为视差值刚好等于 1″的恒星的距离。秒差距的符号是 pc，显然 1pc＝206 265 AU≈3.26 光年。实际上，所有恒星的视差都小于 1″，距离都大于 1 秒差距。视差最大的恒星就是离太阳最近的半人马座比邻星，它的视差值为 0″.76，距离为 1/0.76秒差距＝1.32 秒差距。由于地球绕太阳公转，一年当中地球处在不同的位置上，从地球上观察恒星的位置，相对于更遥远的星空背景应当有所变化，称为周年视差变化。测量这些变化，可以定出恒星的视差值，从而得出距离。

与真实亮度相应的星等称为绝对星等，通常用大写字母 M 来表示。例如，天狼星的绝对星等是＋1.41，太阳的绝对星等是＋4.83。绝对星等与真亮度的关系也服从公式

$$M = -2.5\lg E$$

式中，E 是真亮度。恒星真亮度代表恒星的辐射能力。严格地说，恒星的辐射能力应当计及包括光学波段在内的整个电磁波谱的辐射总量，称为恒星辐射总功率，以瓦特做计量单位，天文学上称之为光度。与光度相当的星等数称为热星等，不能直接由观测来确定，而需结合理论计算求得。太阳的视热星等为－26.82，绝对热星等为＋4.75。在天文学中，恒星光度也常常用一个相对值来表示，这个相对值就是恒星辐射总功率与太阳辐射总功率的比值，或以太阳真亮度为单位的恒星真亮度。它是一个无量纲量，没有单位。如太阳光度＝1，比太阳亮 10 倍的恒星光度＝10，等等。绝对星等 M、视星等 m 与恒星至太阳的距离 D 之间的关系，可以由公式

$$M = m + 5 - 5\lg D$$

来计算，式中 D 的单位是秒差距。恒星的光度，可以用公式

$$L = 10^{1.9-0.4M}$$

来计算，式中 M 为恒星的绝对热星等，1.9 由太阳的绝对热星等换算而来。

5.1.3 恒星光度测量

恒星光度测量就是通过望远镜和辐射探测器测量恒星（或其他天体）的亮度及亮度的变化情况。辐射探测器是天文望远镜的附属设备，可以是照相底片、光电倍增管、电荷耦合器件（CCD）等。用于天文观测的照相底片是专业化要求很高的特制玻璃底片，照相底片放在天文望远镜的焦面上，经过较长时间的跟踪曝光，再经严格控制的冲洗之后，底片上显出黑色的恒星点像。星的亮度越高，星

点黑得越深，黑的程度称为密度；再用一种称为显微密度计的专门设备或自动化的光度数字系统（PDS）对底片上的星点逐一测量，便得到每一颗星的亮度并换算为星等数。光电倍增管能够将望远镜聚焦来的微弱的星光转换为电流，并逐级放大。测量放大后的电流的大小就可以换算为恒星的亮度，称为光电光度测量，精度很高而且测量速度快。对于光度变化较快的天体，光电方法更加合适，但光电倍增管只能对准一颗恒星；而照相底片信息量大，一张底片上有几千颗星，并且底片能长时间保存，这一优点是光电测光所不具备的。CCD是一种二维阵列式光敏电荷存储器件，用耦合的方法读出与光照强度相关的电荷数，达到测光的目的。它是20世纪60年代中期以来出现的最引人注目的探测器件，具有量子效率高、噪声低、波长范围宽、能同时测量视场中的多颗恒星、测量信息可直接送计算机适时处理等突出优点，是当前发展迅速、已经逐步取代照相底片和光电倍增管的新一代辐射探测器。照相底片的量子效率（即到达接收器的所有光子中能被利用的部分所占的比率）最多到4%，光电倍增管可达15%，而高品质的CCD能达到80%以上。CCD把天体的像分成很多细小的单元，称为像素（pixel)，每一个像素只有20微米，所以测量精度非常高。天文学上使用的大面积CCD可做到2 048×2 048个像素，甚至4 096×4 096个像素，而且可以多片拼装使用。CCD应天文探测的需要而发明，现在已迅速扩展到许多领域，直至民用的数码相机、摄像机等，但天文专用的CCD器件仍然是价格十分昂贵的高端产品，每片高达数百万美元。

不论用何种探测器进行光度测量都有两个共同的问题：光度标准和大气消光改正问题。光度标准通常选用已精确知道其星等的定标星；而大气消光受天气、季节、天体的高度和当地大气质量等多种因素的影响，准确地加以改正是相当复杂而困难的。

天体的辐射是多波段的，不同波段有不同的辐射强度。分别测量各个波段的辐射强度可以提供一些很重要的信息。分波段进行的光度测量称为分光光度测量。1953年美国天文学家提出一种UBV三色国际星等系统，即通过加滤光片的方法对每一颗恒星测量3个不同波段的亮度：U代表紫外光，对应于波长350纳米附近的星等；B代表蓝色光，对应于波长440纳米附近的星等；V代表黄绿色光（人眼最敏感的颜色），对应于波长550纳米附近的星等。比较UBV的不同星等数可以获得恒星的温度、颜色等重要信息。

通过分光光度测量还可以获得恒星各个波段的能量分布情况，从而找到具有最大辐射能量的波长，也叫峰值波长λ_{max}，由物理学中的维恩位移定律

$$\lambda_{max} = bT^{-1}$$

即可求得恒星表面的绝对温度T。式中的b是维恩位移常数，$b=2.898\times10^{-3}$米·开。恒星峰值波长越短，恒星的表面温度越高（光盘图5.1.3　通过峰值波

长测量恒星的温度）恒星的内部温度不能由观测得到，只能通过理论分析计算。

根据物理学中的斯特藩-玻尔兹曼定律

$$E = \sigma T^4$$

在已知温度 T 的情况下，可以求得恒星表面单位时间内每单位面积上所有波长的辐射总量 E。式中 σ 是斯特藩常量，$\sigma=5.67\times10^{-8}$ 瓦·米$^{-2}$·开$^{-4}$。

如果已知恒星的距离，可以从视亮度计算恒星的光度 L，由已知的 E 和公式

$$L = 4\pi R^2 E$$

即可计算出恒星的半径 R。

从以上几个公式可以看出，恒星发出的各种波长的辐射中，辐射能量最高的波长值随温度成反比。恒星表面温度越高，能量越向短波波段集中，星光颜色越偏蓝紫色；温度越低，能量越向长波波段集中，星光颜色越偏红橙色。恒星表面单位面积的辐射总量与温度的四次方成正比。辐射能量随温度升高而迅速增加。恒星的光度既同温度有关，也同恒星的体积有关。温度高、体积大的恒星必然是光度大的恒星。

有一些遥远的恒星，它们的辐射穿过大量存在于恒星际空间的星际物质，会受到吸收和散射而使强度减弱，称为星际消光。星际消光与波长有关，波长越短，消光越严重，因而使红光和红外光占的比例加大，称为星际红化，这也是影响测定恒星光度的一个不利因素。

5.1.4 恒星的光谱和分光测量

在可见光范围内，不同波长的光给人眼视觉的感受是颜色不同。颜色直接代表光的波长或频率。红光波长较长，紫光波长较短。各种频率混杂在一起的辐射造成各种颜色的混合，给人眼的感受是白色。如果某种频率的辐射占的比重较大，混合光就偏显某种颜色。太阳光是稍微偏一点黄色的白光。天空的蔚蓝色是由于地球低层大气分子偏重于散射蓝色波长的太阳光而造成的。一些恒星明显偏于某种颜色，那是该种颜色的辐射强度较高的缘故。辐射通过两种不同介质的界面时会产生折射；频率不同，折射率便不同。当太阳光通过一块三棱镜时，由空气—玻璃—空气两次界面的折射，多种频率混合在一起的白光就分成了多种颜色的彩带，按红、橙、黄、绿、青、蓝、紫的顺序，也就是波长从大到小的顺序排列，称为光谱（光盘图 5.1.4　三棱镜分光示意图）。这是牛顿最早实验的方法，发展成为后来的分光技术。使人赏心悦目的雨后彩虹，就是阳光通过富含水滴的云层起到分光作用形成的。如果把一块尺寸足够大的棱镜放在望远镜物镜前端（称为物端棱镜），就可以得到恒星的光谱，即分成各种频率的恒星辐射，这就是早期的恒星分光技术（光盘图 5.1.5　用物端棱镜获得的恒星光谱）。恒星分光技术是物理学在天文研究中起到突出作用的例子。1825 年法国著名哲学家孔德

(A. Comte) 曾经断言："恒星的化学组成是人类绝对不能得到的知识。" 30 多年后，恒星分光技术的出现不仅使天文学家得到了恒星化学组成的知识，还得到了恒星表面大气层的温度、压力、密度以及恒星的质量、体积、磁场状况、自转运动、距离和空间运动的知识，甚至包括宇宙的物质组成、结构和运动规律及演化的知识，开创了人类研究天体的新纪元，导致天体物理学的诞生和长足发展。孔德的断言破灭了。

牛顿发现的太阳光谱是色彩生动而又明亮的连续光谱。凡是炽热的固体、液体和处在高压下炽热的气体都会发出这种连续光谱。1814 年德国物理学家夫琅禾费 (J. Fraunhofer) 发现了在太阳光连续光谱的背景上有许多细细的黑线。1859 年基尔霍夫 (G. Kirchhoff) 和本生 (R. W. E. Bunsen) 发现高温下的化学元素发出的光不是连续的，而是由一条条亮线组成的光谱 (后被称为明线光谱或原子发射光谱)。他们还发现每一种元素都有一些相对位置非常固定的明线，不同的元素绝不雷同，就像人有各不相同的指纹一样。明线光谱成为原子的特征而被称为"原子指纹"。他们还发现，如果高温元素发出的光再穿过低温下同一种元素的蒸气，明线就消失了，显出一条条暗线，形成暗线光谱或吸收光谱，其位置与明线一一对应，完全相同。基尔霍夫通过以上发现总结出著名的基尔霍夫定律：每一种化学元素在高温状态下都能产生辐射而发出自己的明线光谱；同时，在低温状态下，它又能吸收这些辐射，而使光谱中的明线变成暗线。他还提出，将复杂的化合物燃烧成火焰，观察火焰形成的光谱，就能认证出化合物中含有哪些元素 (光盘图 5.1.6　不同的化学元素表现出不同的光谱线)。比较谱线的强度还能确定各元素的含量。这就是后来被广为应用的光谱分析技术。他还提出，太阳光谱中的暗线，是温度较低的太阳大气层中的原子吸收相应的谱线造成的；从太阳的暗线光谱中能够认证出太阳大气的化学成分，从而分析出各种成分的含量。对于遥远的恒星，如果有办法获得它们的光谱，恒星大气的化学成分问题也就迎刃而解了。通过恒星光谱分析，还能确定恒星表面电子压和大气压。电子压由光谱中中性和电离谱线的强度显示，而电子压与大气压之间又存在着密切的关系。根据物理学中的塞曼 (P. Zeeman) 效应，如果光源处在强磁场中，光源发出的光谱线会分裂成数条，裂开的宽度与磁场强弱有关。测量恒星光谱中的塞曼效应，可以测定恒星的磁场强度。太阳磁场比较弱，仅为 $1\sim2\times10^{-4}$ 特斯拉，有些恒星的磁场很强，达数特斯拉。恒星磁场的强弱差异很大。

天文学中获得恒星光谱的方法，除了前面介绍过的用物端玻璃棱镜的方法以外，还可使用棱镜光谱仪，即将棱镜放在望远镜焦点后面，使已经成像的星光经过棱镜分光后再获得光谱。棱镜光谱仪的分光能力超过物端棱镜，但它一次只能得到一颗星的光谱，而不像物端棱镜那样同时得到视场内所有恒星的光谱。分光能力更强的设备是光栅摄谱仪。光栅是一种精密光学器件。在非常平整光洁的光

学平板上，刻画出许多条间隔相等互相平行的细线，做成光栅。利用光的干涉和衍射的叠加原理使通过光栅的混合光分解成光谱。天文学用的典型光栅是每毫米刻 100～1 000 条线的大面积光栅，分反射光栅和透射光栅两种，价值都非常昂贵。光栅摄谱仪将光栅放在望远镜焦面上使用，一次只能获得一颗星的光谱。现代有一种新技术，就是利用光导纤维把望远镜焦面上的许多星像引导到多台摄谱仪上，同时得到许多恒星的光谱。

一颗恒星的光谱是一条只有几厘米到十几厘米长的彩色光带，上面布满了疏疏密密的许多暗线或明线。正是这小巧的方寸之物，将几十光年到几十万光年、几十亿光年远处的庞然大物的种种秘密透露给小小地球上渺小的人类。这既是大自然的神功机巧，也凝聚着聪明人类多少代人的智慧结晶（光盘图 5.1.7 恒星光谱的实例）。

5.1.5 恒星物理研究与量子力学

1. 绝对黑体

一般物体受到辐射时，对辐射能量总是有吸收、有反射。吸收部分占总能量的份额称为吸收系数，其值在 0 和 1 之间。黑颜色的物体吸收能力大于白颜色的物体，吸收系数也较大。如果吸收系数为 1，表示全部能量都被吸收而没有反射。具有这种能力的物体称为绝对黑体。一般物体在某一温度下都会发出辐射，辐射往往表现为包含各种波长的电磁波。所有各种波长的总辐射能力称为其发射本领。吸收系数大的任何物体，发射本领也大，二者的比值是常数，与物体的化学成分和结构形态无关。绝对黑体吸收系数最大，发射本领也最大。非绝对黑体，如果吸收系数为 A（$0<A<1$），则其发射本领为 AE_0，E_0 是绝对黑体的发射本领。实际上，真正严格的绝对黑体是不存在的。但在物理学研究中，总把绝对黑体当作理想的模式进行各种理论推导，再将所得结果推广到一般物体的情形。

2. 普朗克实验和光子概念

1900 年，德国物理学家普朗克（M. K. E. L. Planck）从实验中发现，任何物体发出的辐射，其能量大小随波长而变化。普朗克建立了绝对黑体的辐射强度随波长变化的曲线，这就是著名的普朗克分布图 5.1.8。严格的绝对黑体是不存在的。普朗克使用的是一个非常近似的绝对黑体（图 5.1.9）。取一个不透明的封闭空腔，只开一个小孔，如果外界有辐射进入小孔，将在空腔内多次反射，直至全部吸收，几乎不可能有机会从小孔射出来。它的吸收系数几乎接近 1，因而可看成是绝对黑体。普朗克分布在某一波长处辐射强度取峰值。波长更短或更长的部分有明显的衰减。这用当时的物理理论（牛顿力学和麦克斯威电动力学理论）无法解释。如果认为有限的空间不能容纳比其尺度更大的波存在，因而波长较长的辐射受到衰减，那么波长更短的辐射为何也受到衰减呢？普朗克提出一种能量子（后来被称为量子）概念，认为任何物体发出的辐射都是一份一份的不连续的能量子累加而成的，每一份能量子所含的能量 E 的大小由辐射频率或波长来决定，这就是著名的普朗克公式

$$E = h\frac{c}{\lambda}$$

式中，c 是光速，λ 是波长，$h=6.63\times10^{-34}$ 焦耳·秒，称为普朗克常量（精确的普朗克常量值是根据伦琴射线光谱测定出来的）。波长很短的辐射，能量子能量很大，能量子的个数必然很少，而辐射强度是由能量子的个数决定的，辐射当然也就受到衰减了。

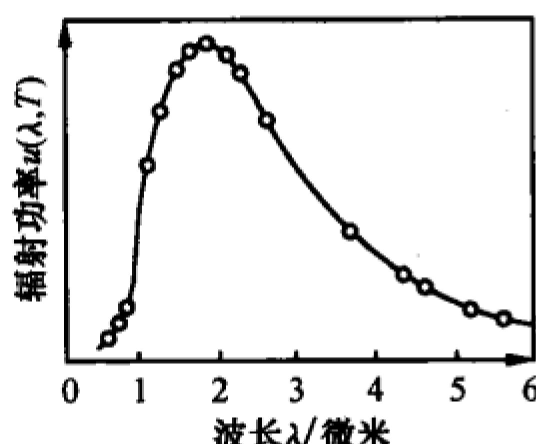


图 5.1.8　普朗克分布

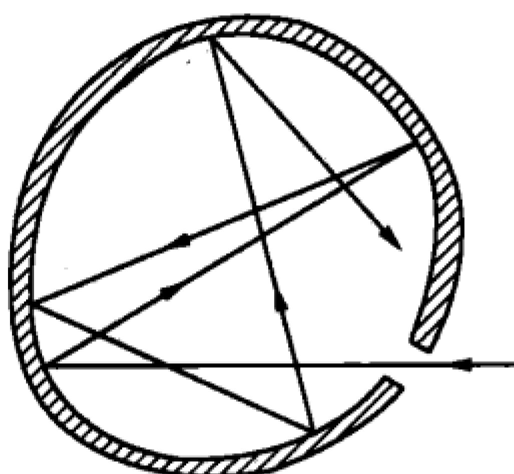


图 5.1.9　绝对黑体的模型

能量子概念和普朗克公式，在当时是一种假设，只是为了解释绝对黑体实验而凭空设想出来的，并没有理论上的根据。就连普朗克本人，事后也花了很大的精力，想从已有的古典理论来解释实验结果而取消能量子概念，但一切尝试都没有成功。他没有料到，普朗克公式孕育着新的自然科学革命，诞生出更深刻的自然科学规律——量子力学。

爱因斯坦等物理学家发展了普朗克的能量子假设，建立起量子力学理论中的光子概念。光子是辐射能量的携带者，辐射是大量光子在流动。光子既是粒子又是波，光子的流动速度、频率和波长就是光波以及其他波段辐射的速度、频率和波长。光子能量按普朗克公式计算。光子能量的总和就是辐射总能量。它只能取光子能量的整数倍而不是任意值。由公式 $E=mc^2$ 和 $E=hc/\lambda$，光子的动质量为

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{h}{\lambda c}$$

按狭义相对论，运动物体的质量 m 与静止质量 m_0 之间有关系

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

因为光子的运动速度 v 就是 c，故上式分母为 0，要使 m 有意义，必须认为 $m_0=0$，结论是光子的静质量为 0。光子一旦出现，必然以光速运动，不可能静止下来。光以及其他波段的辐射，既是电磁波也是光子流；辐射既有波动性也有粒子性（称为波粒二象性），这是 20 世纪初形成的物理学极为深刻的新观念，也是量子力学最基本的观念之一。

3. 斯特藩-玻尔兹曼定律和维恩位移定律的推导

普朗克认为，绝对温度为 T 的黑体辐射时，在一个单位时间内、一个单位面积上，波长在 $\lambda\sim\lambda+\mathrm{d}\lambda$ 区间内，辐射能量为

$$\mathrm{d}u = u(\lambda,T)\mathrm{d}\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5}\bigg/\left[\exp\left(\frac{hc}{kT\lambda}\right)-1\right]\mathrm{d}\lambda$$

式中，h 是普朗克常量，c 是光速，k 是玻尔兹曼常量，$k=1.381\times10^{-23}$ 焦耳·开$^{-1}$。全部辐射能量为

$$u=\int_0^{+\infty}u(\lambda,T)\mathrm{d}\lambda$$

图 5.1.8 是 u（λ，T）在某一温度下辐射功率，即单位时间内的辐射能量随波长变化的曲线（普朗克曲线），u 是整个曲线与横坐标轴围成的面积。积分运算的结果为

$$u=\frac{2\pi^5k^4}{15h^3c^2}T^4$$

式中，u 是单位时间内、单位面积上的所有波长范围内的辐射总能量，即物体表面上的辐射通量密度，或称物体的发射本领 E_0

$$E_0=\frac{2\pi^5k^4}{15h^3c^2}T^4=\sigma T^4$$

这就是斯特藩-玻尔兹曼定律，σ 是斯特藩常量。

普朗克曲线有一个峰值——极大值，对应于发射能量最强的波长 λ_{max}。此 λ_{max} 只要用数学分析中求极值的方法解 $\mathrm{d}u$（λ，T）$/\mathrm{d}\lambda=0$ 即可求得。求解的结果为

$$\lambda_{max}=\frac{hc}{4.965kT}=bT^{-1}$$

这就是维恩位移定律，式中 4.965 是指数方程

$$5e^x-xe^x-5=0$$

的数值解。

斯特藩-玻尔兹曼定律和维恩位移定律可以用图 5.1.10 来表示。表面温度越高的物体，普朗克曲线的峰值越向短波方向靠拢，峰值也越高，曲线与横轴围成的面积越大，单位体积辐射总能量越高。

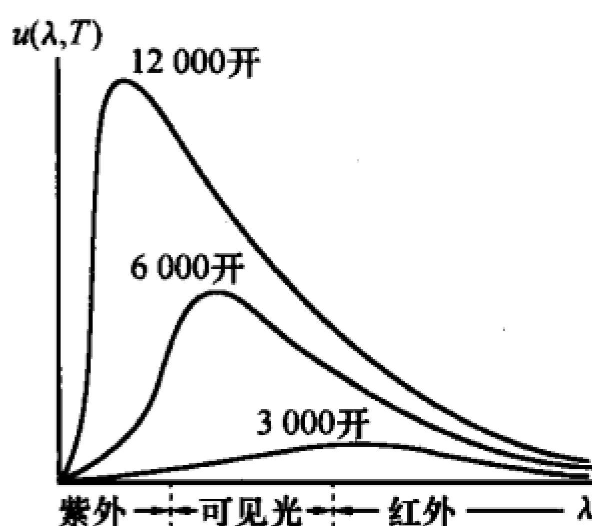


图 5.1.10 维恩位移定律

4. 氢原子谱线结构和玻尔原子模型

1885 年，瑞士物理学家巴尔末（J. J. Balmer）发现了氢原子在可见光区的四条谱线，它们的波长分别为 656.2 纳米（红色）、486.1 纳米（绿色）、434.0 纳米（蓝色）和 410.1 纳米（紫色），强度依次减弱，波长间隔也依次减小。它们的波长可用下面的公式来计算：

$$\lambda=364.56\frac{n^2}{n^2-4}\text{ 纳米}$$

当 $n=3$，4，5，6 时恰好得到四条谱线的波长。这四条谱线被称为氢原子的巴尔末线，分别用 H_α，H_β，H_γ，H_δ 来表示。巴尔末给出的上述计算公式并没有任何理论根据，只是为了与实验相符合而用数字拼凑出来的。

1913 年，丹麦物理学家玻尔（N. Bohr）在卢瑟福原子模型和普朗克能量子假设的基础上提出一种原子结构理论，能够完满地解释巴尔末公式。这一理论对氢原子结构的描述与许多

实验结果相当吻合。玻尔理论认为：在氢原子核外围，电子绕核做圆轨道运动。轨道可能有无限多条，但它们不是任取的，轨道半径只能取一些量子化的值

$$r_n = \frac{\varepsilon_0 n^2 h^2}{\pi m e^2}, \quad n = 1,2,3,\cdots$$



图 5.1.11　原子的能级

式中，h 是普朗克常量，$\varepsilon_0 = 8.854\times10^{-12}$ 库仑^2 · 牛顿$^{-1}$ · 米$^{-2}$是真空中的介电常数，$m=9.110\times10^{-28}$克是电子质量，$e=1.602\times10^{-19}$库仑是电子电荷。当 $n=1$ 时，电子在最内一层轨道上，原子处于第一能级也叫基态，是最稳定的状态。当原子吸收了外来能量（通过加热或受碰撞等方式），电子可能升上高一级轨道或更高一级的轨道（图 5.1.11）。能级越高，原子越不稳定，电子随时有可能跃回低能级轨道，同时以光子形式放出能量，这就是辐射。电子的轨道升级或降级都叫做跃迁。当电子从高能级 n 跃迁至低能级 k $(n>k)$时，辐射出的光子的频率为

$$\nu_{kn} = \frac{E_n}{h} - \frac{E_k}{h}$$

E_n 和 E_k 是电子处于 n 级和 k 级轨道上时原子的能量。按玻尔给出的公式

$$E_n = -\frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 n^2 h^2}, \quad n = 1,2,3,\cdots$$

不难计算

$$\nu_{kn} = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^3}\left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$

或

$$\lambda_{kn} = \frac{1}{R}\left(\frac{k^2 n^2}{n^2 - k^2}\right)$$

式中，$R=me^4/8\varepsilon_0^2 h^3 c=1.097\,373\times10^7$ 米$^{-1}$，称为里德伯常量。里德伯(E. J. Rydberg) 是瑞典物理学家，这一算式是他最先给出的。当电子从 n 能级跃迁至 k 能级时，便辐射出具有特定能量的光子，同时显现出与光子能量相应的谱线，其波长即 λ_{kn}。取 $k=2$，$n=3$，4，5，6 时算出的 λ_{kn} 就是四条巴尔末线 H_α，H_β，H_γ，H_δ 的波长。如果 n 取值更大，还可以算出更短波长的光谱，只是已超出可见光范围进入紫外线区了。n 越大，波长越短，谱线的波长间隔越密。当取 $n=\infty$时，λ 达极限值 $4/R=364.5$ 纳米，会有非常多的谱线集中在这一波长上。从最大波长的 H_α 线到最短波长的极限值，有无穷多条谱线，构成一个谱线系列，称为巴尔末系；它们都是电子从第 3 能级以上的轨道跃迁回第 2 能级（$k=2$）轨道时产生的辐射（图 5.1.12，单位 0.1 纳米）。当然，在一个时刻一个氢原子只能放出一条谱线，大量氢原子同时放出各种不同的谱线，才能使我们看到复杂的光谱。如果取 $k=1$，可以得到电子从第 2 能级以上的轨道跃迁回基态的一系列谱线，波长为 121.5 纳米，102.5 纳米，97.2 纳米，…，91.1 纳米，称为赖曼系。取 $k=3$，还可以得到从第 4 能级以上跃迁回第 3 能级的帕邢系，它们的波长是 1 874.6 纳米，1 281.5 纳米，…，820.4 纳米等。赖曼（T. Lyman）是美国物理学家，帕邢（F. Paschen）是德国物理学家。各线系的简图如图 5.1.13 所示。

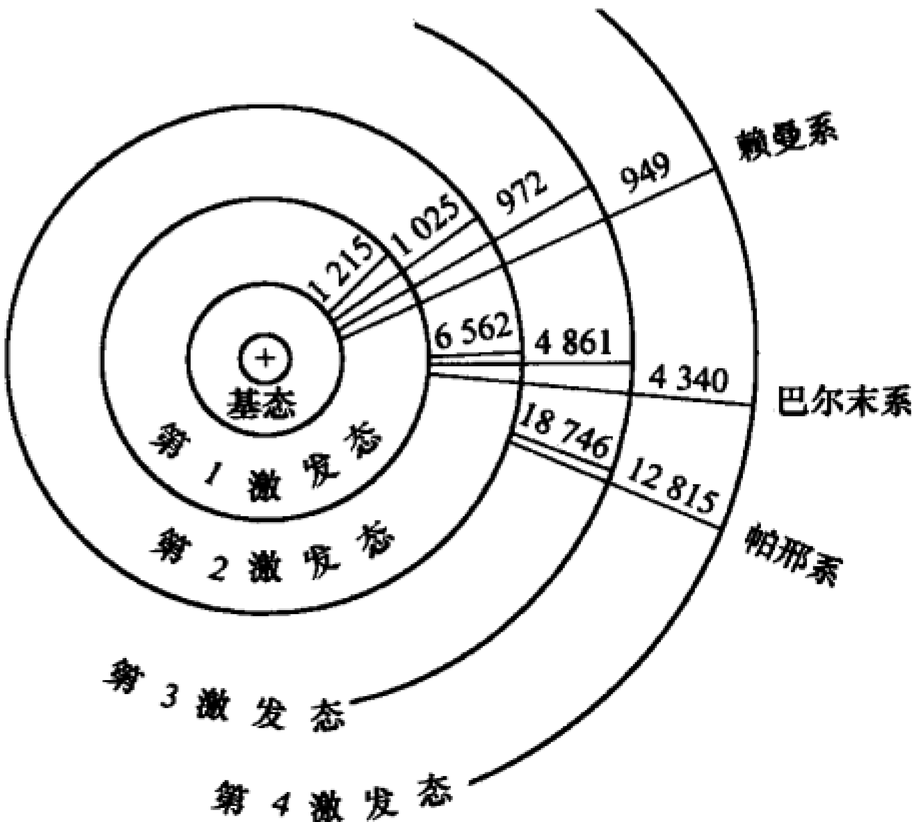


图 5.1.12 氢原子的发射

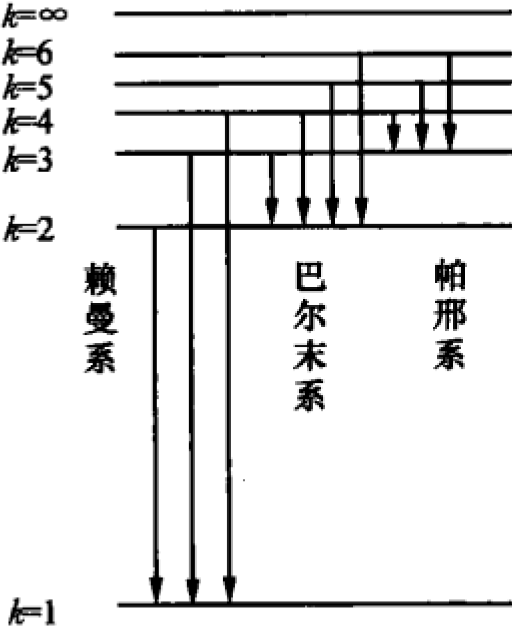


图 5.1.13 氢原子谱线系

玻尔原子模型用量子观点很好地解释了氢原子谱线系的生成规律。1915 年，德国物理学家索末菲（A. Sommerfeld）改进了玻尔模型，用椭圆轨道代替电子的圆轨道，并考虑了轨道的空间取向及电子自旋的问题，使理论与实验结果更加吻合，这就是著名的玻尔-索末菲原子理论。

5. 量子力学概念

玻尔-索末菲原子理论的辉煌年代并没有维持太久。它只是 19 世纪古典力学理论与 20 世纪量子力学理论之间过渡的桥梁。从现代量子力学观点来看，玻尔-索末菲理论原则上是错误的。它依然把电子看成是符合牛顿力学和麦克斯韦电动力学的古典粒子，只是加上轨道量子化的条件。它调和了两种不兼容的理论，把它们糅合在一起，自身不具备完整的体系。从实验结果上，虽然能够解释氢原子和类氢离子的谱线，但对于其他原子，理论与实验却不相符。理论自身也有说不通的地方，如轨道为什么分能级？电子在跃迁过程中，循什么路线运动？在各级轨道之间究竟有没有电子存在？

1924 年，法国一位富有洞察力的物理学家德布罗意（他同时也是一位法国贵族王子，名字很长：Louis Victor Pierre Raymond de Broglie）提出粒子也有波动性，并发现了电子衍射现象。1925 年，德国物理学家海森伯（W. K. Heisenberg）在玻尔指导下发表了电子能量状态和其他基本物理量之间的关系。这一新的理论很快就被德国人波恩（M. Born）归纳为简单的矩阵形式从而提出了说明一切量子现象的新理论——矩阵力学。1926 年，奥地利物理学家薛定谔(E. Schrödinger)发展了德布罗意的思想，成功地创立了波动力学。他把物质粒子视为波动粒子，认为粒子的运动即波的传播，从而建立了波动方程。这个方程按一定条件求解，能求得氢原子谱线的频率和强度。1927 年海森伯发表“测不准原理”：同时正确地确定一个粒子

的位置和动量是不可能的，其位置的测不准量 Δx 和动量的测不准量 Δp 之间存在关系 $\Delta x \cdot \Delta p \geqslant h$，$h$ 是普朗克常量。在古典世界里物体都很大，h 值小到可以视为 0，在这个意义上位置和动量可以同时测准。但在微观世界里，位置和动量不可能同时测准，因此微观粒子的运动路径不可能唯一地确定，只能取一定的概率。不久之后，天才的英国理论物理学家狄拉克（P. A. M. Dirac）用非常简洁优美的数学形式统一了矩阵力学和波动力学这两种等价的理论，最终建成了现代量子力学的理论架构。那时狄拉克只有25岁。

量子力学认为光以及其他波段的辐射既是波也是粒子；各种物质粒子既是粒子也是波。总之，所有物质都具有波粒二象性——兼有波动性和粒子性两种性质。原子里的电子运动并无确切的轨道；只能说电子出现在空间某一位置的概率有多少。玻尔-索末菲描述的电子轨道只是表示电子出现机会最多的地方。核外空间中单位体积内出现电子的概率叫做概率密度。概率密度在空间的分布可以形象地称为“电子云”。电子云浓密之处，电子出现的机会就多；电子云稀薄的地方，电子出现的机会很少。电子云并不表示电子的实际所处状态，只是帮助人们认识微观世界的一种图像。半个多世纪以来，量子力学是成功的，它已深入到大部分科研领域，不仅具有理论上的完备性，还使人类有了激光、电子显微镜、大规模集成电路和核能这些非常实用的东西。量子力学是 20 世纪物理学最深刻的革命之一，是人类智能史上最重要的革命性突破，同时也是现代天体物理学的重要理论支柱之一。

迄今为止，还从未发现过量子力学理论与实验之间有任何偏离。但量子力学理论冲击了人们的传统观念，纠缠着客观物质世界的存在与人类的认知是否相关的深刻的哲学问题。又是波又是粒子以及许多概率性质的不确定性都是令人困惑的。就连爱因斯坦也都怀疑量子理论的客观真理性。他与玻尔之间有过长期的论战，并曾提出警告说：“上帝不会玩掷骰子的游戏。”玻尔本人也曾说过：“谁要是不为量子理论感到困惑，那他就是没有明白量子理论。”直到今天，这场争论仍在两位英国物理大师剑桥大学的霍金（S. Hawking）和牛津大学的彭罗斯（R. Penrose）之间继续进行着，霍金继承玻尔，而彭罗斯倾向于爱因斯坦。霍金说：“上帝不仅掷骰子，而且有时还把骰子掷到人们看不到的地方去，使人们迷惑不已。”尽管争论仍在进行，量子力学毕竟已经占据着现代物理学的重要地位，爱因斯坦要驱逐原子中的量子幽灵，并没有获得成功。玻尔-索末菲的旧量子理论虽然是错误的，错误的要害是完全没有考虑粒子的波动性。但它在量子力学正式提出以前能够清楚地说明氢原子谱线产生的机制，而且简单明了，在历史上曾起过很大的作用，结论也是正确的，所以至今仍是大学物理学课程中必备的知识。至于错误的理论为何能导出正确的结果，这一点很多物理学家认为还是一个未解之谜。

如果认为古典力学和量子力学分别适用于宏观物体和微观物体，量子力学对宏观物体无效，这是不正确的。量子力学不仅可以完满地解释氢原子谱线，能解释一切微观粒子的物理行为，而且也同样能解释宏观物体的运动规律。量子理论涵盖了牛顿和麦克斯韦的古典理论，并且比古典理论更深入、更广泛。用薛定谔方程也能计算行星的轨道，并可得到与牛顿力学同样的结果。根据测不准原理，由量子力学计算的行星位置应存在不确定性，但这种不确定性的数值范围非常小，只有 10^{-33} 厘米，是完全可以忽略不计的。量子理论乃是当代人类认识到的最深刻的物理理论之一，它的应用范围从原子核一直延伸到星系际。但它毕竟不是终极理论，在比基本粒子小得多的时间、空间领域里是否仍然适用，现在还不得而知。

5.2 恒星的位置及运动参数

星海茫茫，无数的光点，它们究竟居于何处？离我们多远？它们向何方运动？快慢速度如何？这是对恒星进行研究需要解决的基本问题。人类研究这些问题已经有几千年的历史，现代天文学掌握了相当丰富的信息。

5.2.1 恒星的位置

恒星在三维空间中的位置，需要有3个坐标参数来描述。在第2章中介绍过任一天球坐标系都含有两个坐标参数，决定着恒星的球面位置，如果再加上第3个参数——距离，恒星位置的问题就完全解决了。

1. 恒星的球面位置

确定恒星的球面位置，通常使用的是天球赤道坐标系，两个参数是恒星的赤经α和赤纬δ。给出这些参数的天文资料是“星表”和“星图”。人类历史上最古老的星表是中国战国时代石申编制的《石氏星经》，载有121颗恒星的位置。现代提供恒星位置的星表从功能上可分为两类：一类是给出精确位置数据且分布比较均匀，整体精确度高的基本星表；另一类是供天文观测时寻找目标天体用，或作大量恒星位置数据统计用的相对星表。星表中恒星的位置数据是用专门的设备和方法观测得来的。观测也分两类：一类是绝对观测；一类是相对观测。绝对观测不依赖于任何已知恒星的位置数据；相对观测根据已知位置数据的恒星，测量未知恒星与已知恒星之间的坐标差值而获得未知恒星的位置。绝对观测需用子午环等专门仪器反复进行，难度较大，精度要求高，只能对少量骨干星进行；相对观测常用照相方法测定大量恒星的位置。基本星表主要依靠绝对观测和一部分恒星的高精度相对观测而编制，星数不多，只限于比较亮的恒星。相对星表以基本星表为依据，完全采用相对观测方法，包容尽可能多的恒星位置数据。

现代最重要的基本星表是德国天文学会编制的奥韦尔斯基本星表，它的最新版本称为FK5，1988年出版，包括4 652颗恒星。其他的基本星表有美国1937年出版的博斯星表，也叫GC星表，包括33 342颗恒星；美国1952年出版的N30星表，有5 268颗恒星，精度都不如FK5高。重要的相对星表有：1886年出版的德国BD星表，星数457 847；1973年以磁带方式出版的德国天文学会AGK3星表，星数183 000。

1972年完成的以照相底片方式发行的帕洛玛星图，美国国家地理学会和帕洛玛天文台联合制作，共985对底片，用口径1.83/1.22米施密特望远镜拍摄，每对底片分别用红敏和蓝敏技术拍照同一天区6°.6×6°.6范围，底片尺寸35.5

厘米×43.2厘米，包括赤纬－45°以北所有暗至21等的恒星和其他天体，总星数约几十亿颗。为了将星图扩大到整个天球，位于澳大利亚的英澳天文台用与帕洛玛相同的望远镜（光盘图5.2.1　英澳天文台的施密特望远镜）拍摄蓝敏底片，位于南美洲智利的欧洲南方天文台用1.52/1米施密特望远镜拍摄红敏底片，各606张，包括赤纬－17°.5以南所有暗至22～23等的恒星，1996年完成，称作ESO-SRC南天星图，共1 212张底片，售价2.4万德国马克。两份星图覆盖了整个天球，并且已经完全数字化，将所有的数据压缩在200张光盘上。这是目前最有权威性的恒星球面位置数据，为专业天文机构使用。

20世纪60年代末期，美国史密松天体物理台出版了由计算机绘制的SAO星图，星数258 997颗。20世纪80年代末，美国宇航局（NASA）发表了储存在光盘上的GSC星表。原是为哈勃空间望远镜用的工作星表，星数1 800多万颗，可快速显示于计算机屏幕上或打印在纸上，使用非常方便。

1989年8月欧洲空间局（ESA）发射了依巴谷天体测量卫星（Hipparcos，这是high precision parallax collecting satellite的缩写字，也是谐音纪念古希腊天文学家喜帕恰斯），精密测定了11.8万颗恒星的位置数据，精度高达0″.001～0″.002，超过了FK5基本星表，是恒星位置数据的重大突破（光盘图5.2.2　依巴谷天体测量卫星），1997年6月ESA发表其最后成果Hipparcos and Tycho星表。包括Hipparcos星表118 218星，Tycho（为了纪念丹麦天文学家第谷·布拉赫）星表1 058 332星，Tycho2星表2 539 913星。1996年，美国海军天文台编纂了一本包括4.9亿多颗恒星和星系的星表，后来又扩充到1 045 913 669颗暗至21等的天体，位置精度0″.2，是当前星数最多、又有较精确位置的星表，名为USNO-B。

2. 恒星的距离

恒星距离的测定比球面位置测定要困难得多。最直接可靠的方法是三角视差法。使用长焦距的天体照相仪分区拍摄恒星照片，将相隔半年的同一天区照片进行对照，测出因地球公转运动造成的恒星周年视差，再用解三角形的方法算出距离。由于测角精度受到0″.01的限制，三角视差法只能适用于距离小于100秒差距的近距恒星。至1963年只测定了6 400多颗星的距离，发表在《恒星三角视差总表》及其补编GCTSP中。近年来空间天体测量的发展及CCD技术的应用，用电子记录方式代替照相底片，哈勃空间望远镜、依巴谷天体测量卫星及一些地面大型光学望远镜都有三角视差测定计划，测量精度可望提高到0″.001，星数也会大大增加。最近美国NASA天文数据中心发行的天文数据光盘已经列有9 359颗星的三角视差数据，已测出三角视差的恒星总数约1万多颗。

另一种测定恒星距离的方法是分光视差法，即利用分光技术获得恒星的光

谱，从光谱线的某些特征可推知恒星的绝对星等，再从恒星光度测量测出视星等，然后通过 5.1 节介绍过的绝对星等、视星等与距离的关系公式

$$M = m + 5 - 5\lg D$$

计算出天体的距离。恒星光谱中氢巴尔末线的宽度，一些金属元素如锂、钙、钾、镁、锶、钛、铁等的谱线强度都和绝对星等有关。凡具有这些谱线明显特征的恒星，都可以用分光视差法测定它们的距离。目前已获得分光视差数据的恒星有 6 万颗以上。一般来讲，分光视差精度低于三角视差。但分光视差的精度高低与恒星远近无关，而三角视差的精度随恒星距离变远而下降。故对于较远的恒星，分光视差精度反而高于三角视差。

除以上两种方法之外，还有其他测定恒星距离的方法。距离越远，难度越大，精度越低。对这些方法在以后的章节中涉及有关知识时再作介绍。

5.2.2 恒星的运动参数

恒星在三维空间中的运动，投影到三个坐标轴方向，也需三个参数来描述。沿视线方向的运动称为视向运动；在与视线垂直的平面上有两个方向的运动，称为自行。

1. 恒星的自行

自行可以分解为天球球面上沿赤经方向和沿赤纬方向的球面坐标运动，用单位时间内运动的角度来计算。因为恒星运动速度相对于遥远的距离，显得非常缓慢，自行通常考虑为等速直线运动，单位取角秒·年$^{-1}$。自行值的大小显然与恒星距离有关，如果实际空间运动速度相同，星的距离越近，自行表现越大，所以自行大的星一般也都是距离较近的星。目前已知自行最大的恒星是巴纳德星，1916 年由美国天文学家巴纳德（E. Barnard）发现，自行值为 10″.31/年，距离只有 5.9 光年，近的程度仅次于比邻星和半人马座 α（光盘图 5.2.3 巴纳德星的自行）。

精确测定恒星自行也是非常困难的。天文学上的做法也是比较用同一仪器拍摄的同一天区的两张照片，拍摄时间相隔几年或十几、几十年，以很暗的星作背景，用精密的量度仪器测量星像位移的情况。在基本星表和重要的相对星表中，都有恒星的自行数据，总数约有 20 多万颗。精度较高的当然是基本星表 FK5，但是数量太少，只有 4 652 颗。依巴谷天体测量卫星虽然高精度地测量了 11.8 万颗恒星的位置，但由于飞行时间短，自行数据很难准确，精度低于 FK5 星表。计划将来发射第二个天体测量卫星，与第一次相比较，以获得高精度的大量恒星的自行数据。

2. 视向速度

恒星沿地球上的视线方向有远离或趋近两种可能的运动速度，称为视向速度。视向速度测定的方法与测自行完全不同。它不是用几何方法而是用物理方法测定的。其方法的原理叫多普勒效应。1842年，奥地利物理学家多普勒(J. C. Doppler)指出，波源与波的接收器之间，如果有相对运动，接收器接收到的波长应当与波源发出的波长有所不同，靠近时波长变短，远离时波长变长。波长λ的变化量$\Delta\lambda$与λ之间应当满足公式

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda}=\frac{v}{v_s}$$

式中，v是相对运动速度，v_s是波的传播速度。这一现象称为多普勒效应。光波与声波都有这种效应。站在月台上的人，遇到鸣笛疾驶而过的火车，注意倾听汽笛声调的变化，一定会发现火车从远驶近时笛声尖锐，一旦驶过身边由近驶远时，声调变得低沉，火车速度越快，差别越明显，这就是声波的多普勒效应（光盘图 5.2.4　声波的多普勒效应）。光波的多普勒效应表现为，当光源与观测者之间有视向运动时，光源发出的光被观测者测到的时候，波长发生变化。这一变化与光源至观测者之间的距离无关，只与两者之间的视向运动方向和速度有关。相向运动时，波长变短，如果是可见光，就向紫的方向变化，称为紫移；相背运动时，波长变长，可见光向红的方向变化，称为红移。波长的变化量$\Delta\lambda$与相对的视向运动速度v服从多普勒公式

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda}=\frac{v}{c}$$

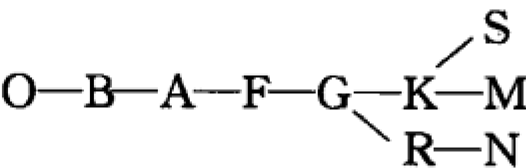
式中，λ是光源发出的光的波长，c是光速。

恒星辐射的波长反映在光谱上。某种元素的谱线发射时对应于一定的波长值，这是原子的特性，是不会改变的。但是地球上的望远镜接收到这种谱线时，它的波长会因恒星的视向运动速度而改变，或有红移或有紫移。测量出这一改变的量$\Delta\lambda$，就可以通过多普勒公式计算视向运动的速度。当$\Delta\lambda>0$时，光谱线有红移，视向速度为正值，恒星远离我们而去；当$\Delta\lambda<0$时，光谱线有紫移，视向速度为负值，恒星向我们靠拢而来。恒星光谱中有很多条谱线，多普勒效应造成的位移对每一条谱线都是一样的，即集体位移，所以这种位移比较容易判断出来（光盘图 5.2.5　恒星光谱线的红移和紫移）。用这种方法测定视向速度，一般说是比较可靠的，而且测量精度与恒星远近关系不大，只要有比较清楚的光谱图像即可。当然，谱线不限定在可见光波段，其他波段的谱线及其位移用专门的仪器也能观测到，在这种场合，仍然将波长变短称为紫移，波长变长称为红移，虽然含义已经有点不太确切了。

5.3 主 星 序

5.3.1 光谱型

光谱是恒星的身份证。大多数恒星的光谱是在连续背景上有许多吸收线（暗线），少数恒星兼有发射线（亮线）或只有发射线。到 20 世纪初，美国哈佛大学天文台对已经拍到的 50 万颗恒星的光谱进行了研究，并对它们分类。他们用 7 个英文字母将恒星光谱分为七类，在每种类型的英文字母后面再加上 1 位阿拉伯数字，细分为 10 个次型。如织女星是 A0 型，天狼星是 A1 型，北极星是 F8 型，太阳是 G2 型等。后来又在字母 G 和 K 型后面加上 S，R，N 三个亚型，构成了由 10 个字母表示的 100 种光谱型系列，顺序为



分类的主要判据有：连续谱的能量分布，谱线的数目和强度，特征谱线所属的化学元素等。这一分类系列称为哈佛分类法。并不是每一光谱型都有 10 个次型，有些次型是缺项。例如，O 型星里至今没有找到 O0、O1 和 O2 型。

哈佛分类法的光谱型系列实际上是一个恒星表面的温度系列，也是一个颜色系列。从左到右对应于温度的下降和颜色的由蓝到红。最热的 O 型星温度约为 40 000K，蓝色；最冷的 M 型温度约为 3 000K，红色。其他各型的温度和颜色见表 5.3.1。

表 5.3.1 各光谱型温度与颜色的关系

光谱型	恒星表面温度/开	恒星颜色	光谱型	恒星表面温度/开	恒星颜色
O	40 000～25 000	蓝色	G	6 000～5 000	黄色
B	25 000～12 000	蓝白色	K	5 000～3 600	橙色
A	12 000～7 600	白色	M	3 600～2 600	红色
F	7 600～6 000	黄白色			

R、N、S 三个亚型仅反映化学组成的差别。R、N 与 K、M 型的光谱类似，只是 R、N 型光谱中有较强的碳分子和氰分子（CN）吸收带，K、M 型光谱中有较强的金属氧化物吸收带，故有时称 R、N 型星为碳星，K、M 型星为含氧星。S 型光谱与 M 型类似，但有很强的氧化锆（ZrO）分子吸收带并且往往伴有氢的发射线。由于历史的原因，人们习惯地称呼 O、B、A 型星是早型星，K、

M 型星是晚型星，F、G 型星为中型星，意为与恒星的演化年龄有关。现在知道这种叫法含义不太准确，光谱型顺序并不与恒星的演化年龄相对应。

在基本星表和重要的相对星表中都有恒星光谱型的数据。如果一颗星的光谱被认证到光谱型系列中，它的一般物理特性就可以知道了，不必对其光谱再作详细测量。在以太阳为中心以 450 秒差距（约 1 500 光年）为半径的银河系空间中，B 型星约占 1%，A 型星约占 1.5%，F 型星约占 8%，G 型星约占 13%，K 型星约占 20%，M 型星约占 56%，其余各型共约占 0.5%，可见低温度的恒星比高温度的恒星要多。由于光谱型对恒星物理研究的重要性，调皮的美国大学生为了记住光谱型的 10 个字母，编了一句俏皮话：Oh，Be A Fine Girl Kiss Me! Right Now，Smack!

哈佛分类法是最通用的恒星光谱分类法。全世界按哈佛分类系统作过光谱型分类的恒星总数达 90 万颗以上。哈佛分类的主要参数只有一个，就是温度，属一元分类法。20 世纪 40 年代，美国天文学家摩根（W. W. Morgan）和凯南（P. C. Keenan）提出一种二元分类法，即在哈佛分类法以温度为依据的基础上，再加一个光度数据。光度共分七级，用罗马数字表示，附在哈佛分类标记后面，分别表示：Ⅰ，超巨星；Ⅱ，亮巨星；Ⅲ，正常巨星；Ⅳ，亚巨星；Ⅴ，主序星（矮星）；Ⅵ，亚矮星；Ⅶ，白矮星。如果有必要，在罗马数字后面再加小写英文字母排列光度顺序。所谓巨星和矮星指的是光度大小，光度大的也就是真亮度大的为巨星，小的为矮星。至于主序星和白矮星下文即将介绍。这一二元光谱分类系统称为 MK 系统。目前只对已作哈佛分类的一部分恒星做了 MK 系统分类，以后将逐步扩大进行。太阳的 MK 光谱型是 G2Ⅴ，表明太阳是一颗黄色主序星；参宿七（猎户座 β）的 MK 光谱型是 B8Ⅰa，表明它是一颗光度特别大的蓝白色超巨星。

5.3.2　赫罗图——光谱光度图

丹麦天文学家赫茨普龙（E. Hertzsprung）和美国天文学家罗素（H. N. Russell）各自独立地提出了恒星的光谱型与光度之间存在着相关关系，并以图形来表示，称为赫罗图或 H-R 图。

光谱型是温度的标记，也是颜色的标记；光度也可用绝对星等来表示。光度的单位是太阳的真亮度。从恒星的绝对星等与太阳的绝对星等的差数可以计算恒星真亮度与太阳真亮度的比值，也就是恒星的光度（见 5.1.2 小节）。例如，织女星的绝对热星等是 0.50，太阳的绝对热星等是 4.75，它们的亮度比为

$$\frac{E_1}{E_2} = \sqrt[5]{10^{2\times 4.25}} \approx 50$$

这就是织女星的光度。在一般情况下，忽略绝对星等与绝对热星等的差别。

赫罗图以光谱型（或温度）为横坐标，以光度（或绝对星等）为纵坐标，把所有已知光谱型和光度的星点在图上，每个点代表一颗星。结果发现，全部星点群集在三个不同的区域里（图 5.3.1）。大多数（占 90%以上）星落在从左上角延伸到右下角的带状区域，称为主星序。在这个序列里的星就是主序星。几乎所有肉眼能见到的恒星都是主序星，只有少数又红又亮的星除外。太阳是一颗非常标准的主序星（光盘图 5.3.2 根据真实数据描画的恒星彩色赫罗图）。

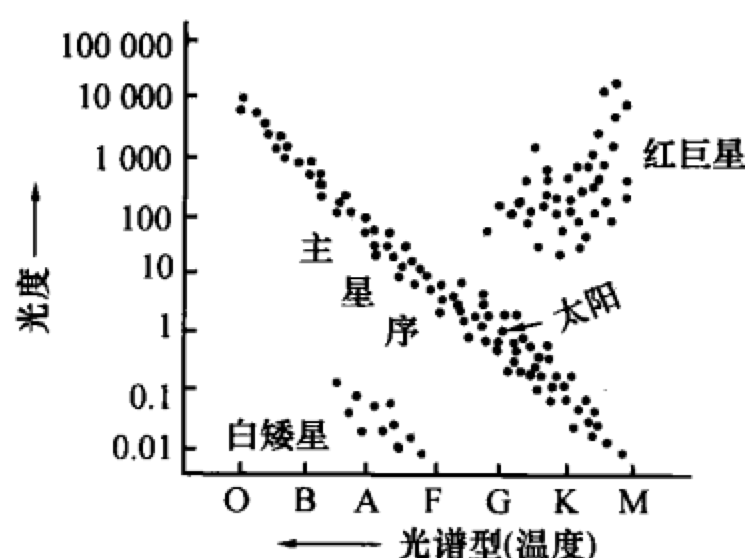


图 5.3.1 赫罗图

主星序表明，大多数恒星都服从温度越高光度越强的规律，这也是斯特藩-玻尔兹曼定律显示的必然结果：恒星表面单位面积的辐射能量与温度的四次方成正比；如果面积都相等，温度一高，光度当然也就高上去了。

赫罗图的右上角有一个点群，这些星温度偏低、颜色偏红，但光度却很大。按斯特藩-玻尔兹曼定律来理解，必然发光面积特别大，也就是恒星的体积特别大，称为红巨星或红超巨星。肉眼所见的大角星（牧夫座 α）、北河三（双子座 β)、毕宿五（金牛座 α）是红巨星的例子；参宿四（猎户座 α），心宿二（天蝎座 α）等是红超巨星的例子。它们都是银河系中体积非常大的恒星。如果把参宿四放在太阳的位置上，地球和火星都要装到它的肚子里。H-R 图的左下角也有一个点群，温度很高，颜色偏白，光度却很小，这一定是体积很小的星，称为白矮星。天狼星伴星就是典型的白矮星的例子（见 1.3 节）。

赫罗图简单明了，却有着深刻的含义，为许多研究课题所使用，是现代天文学中非常重要的图表。

5.3.3 主序星

主序星是恒星一生中处于稳定阶段、停留时间最长的恒星。恒星在这个阶段停留的时间占整个寿命的 90%以上，相当于人生的青壮年阶段。主序星的内部化学成分基本相同，产生能量的机制也基本相同，都是由氢原子核聚变为氦原子核产生的能量。在恒星演化早期，还没有发育成熟的时候，核聚变反应还没有形成规模，恒星在赫罗图上处于主星序右边的位置。当恒星演化到晚期，内部的化学成分和产能机制都发生了较大的变化，就会离开主星序转移到赫罗图中别的位置上去。主星序阶段的恒星有的处在温度和光度都较高的位置（赫罗图的左上部），有的处在温度和光度都较低的位置（赫罗图的右下部），主要随恒星的质量而定。质量越大的主序星光度越高，温度也越高。主序星的光度大约和质量的

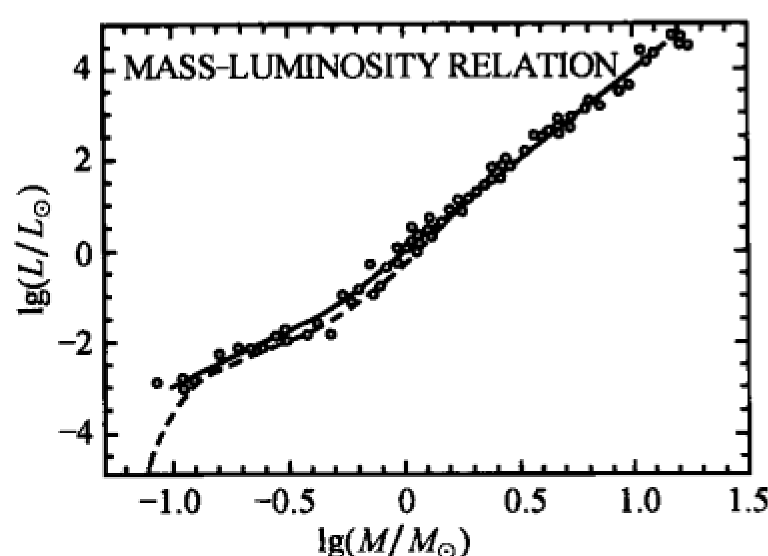


图 5.3.3　恒星质光关系图

3.5～4 次方成正比，这一规律称为“质光关系”。它提供了一个估计恒星质量的重要方法。图 5.3.3 是根据实际观测资料画出的恒星质光关系图。$M/M_\odot$ 表示以太阳质量为单位的恒星质量，$L/L_\odot$ 表示以太阳光度为单位的恒星光度。lg（$L/L_\odot$）与 lg（$M/M_\odot$）存在线性关系：lg（$L/L_\odot$）＝$b$lg（$M/M_\odot$），表明 $L\propto M^b$，$3.5\leqslant b\leqslant 4$，即光度与质量的 3.5 至 4 次方成正比。

质量是恒星最重要的一个物理量，是与恒星内部的物理性质和恒星的演化历程有关的决定性的参数。恒星的质量很难测定。测定质量比较可靠的方法是动力学方法，但这种方法只有对相互绕转的双星才有可能使用，有关的知识将在 5.4 节介绍。恒星在主星序阶段停留时间的长短也取决于质量：质量大的停留时间短，质量小的停留时间长。太阳停留在主星序阶段的时间大约是 100 亿年，有 15 个太阳质量的恒星在主星序阶段停留的时间只有 1 500 万年，1/2 太阳质量的恒星在主星序阶段停留的时间会长达 2 000 亿年。不同质量的恒星，寿命相差很远。恒星的质量有一定的限制范围。最大不超过太阳质量的 150 倍，最小不能小于太阳质量的 0.05。当质量大到 60 倍太阳质量以上时，光度大于 10^6，星体很不稳定，强大的辐射压力会把恒星外层的大量物质吹跑，造成大量的恒星风损失；当质量小于 0.05 太阳质量时，内部温度和压力太低，不足以形成热核反应，不能发光发热而失去恒星的资格。无论质量大小，恒星内部由氢聚变为氦的热核反应是维持主星序阶段的主要物理标志。一旦氢燃料消耗殆尽，恒星就进入晚年，离开主星序，由衰老而死亡。不同质量的恒星，衰老和死亡的表现大不相同。详细的介绍将在第 9 章中展开。

5.4　双　星

5.4.1　双星的发现

双星是两颗恒星，像地球和月亮绕着它们的公共质心转一样互相绕着转。恒星中约有半数以上是双星，但因为距离遥远，分辨不清，看起来以为是 1 颗星。

18 世纪以前，人们只偶然发现有两颗恒星靠得非常近，最典型的一对是开阳和辅。开阳是北斗勺把上的第二颗星，即大熊座 ζ 星，中国古星名为开阳。好眼力的人能够分辨出紧靠开阳旁边有一颗小星，中国古星名为“辅”（光盘图

5.4.1 开阳与辅)。据说古代征兵时用它来检验士兵的视力。现代知道，它们不只是两颗星，而是由6颗恒星组成的家族。天文学家在望远镜里看到有两颗星靠在一起，原先都以为只不过是偶然巧合在同一方向，看似很近，其实并没有什么关连。直到1779年，天文学家迈耶（C. Mayer）才想到有可能存在互相绕着转的双星。1802年英国天文学家威廉·赫歇尔（W. Herschel）开始认真搜寻成对的恒星，4年之内找到434对。他通过非常细致的观测，发现了它们确实是在万有引力作用下互相绕着转的恒星。图5.4.2是他观测到的第一对双星双子α，中文名北河二，距离49光年。此后，双星研究成为天文学家的重要课题。一些人为此付出了毕生的精力。距离较近，或彼此分得比较开的双星，能用望远镜观测到两颗星的光学像，这样的双星称为目视双星。图5.4.3是目视双星蛇夫座70的轨道。已发现的目视双星将近8万对。比较著名和容易观测到的目视双星有猎犬α（常陈一）（光盘图5.4.4 目视双星猎犬α）、小犬α（南河三）、天蝎α（心宿二）、室女、天鹅β（辇道增七）（光盘图5.4.5 目视双星天鹅β）、天鹅δ、武仙ζ等。有更多的双星不能直接观测到两个像，需要用间接的方法来判断它们是双星。

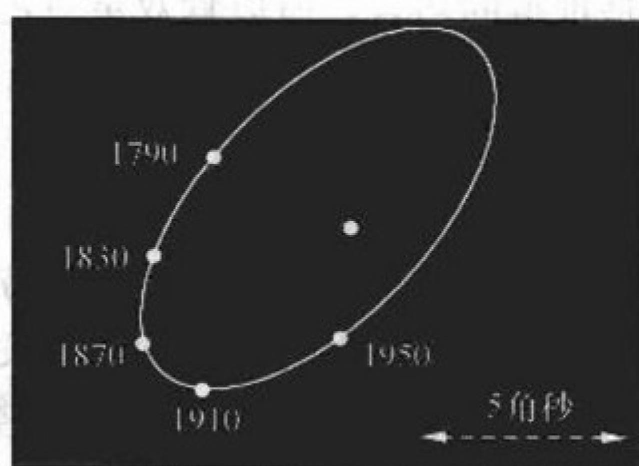


图5.4.2 双星北河二的轨道

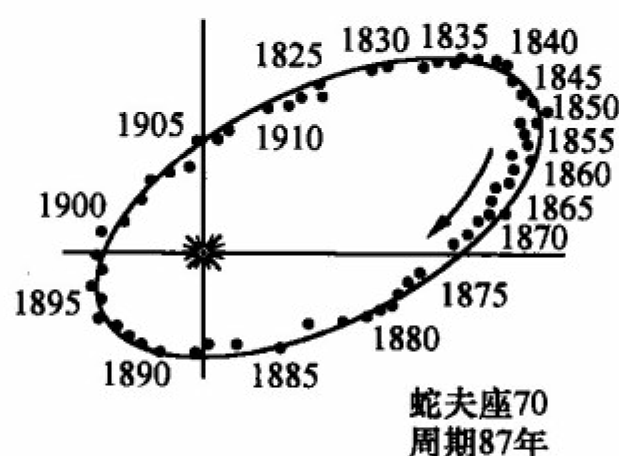


图5.4.3 双星（蛇夫座70）的轨道

5.4.2 食双星

当双星的轨道面与我们的视线几乎在一个平面上时，我们就会看到一颗星挡住另一颗星的掩食现象，就像发生日食那样，星光会明显变暗。这种双星叫食双星。最典型的也是最早发现的食双星是英仙座β，中国星名大陵五，西方也称之为“魔星”(Algol)。它的轨道周期是2天20小时48分55秒。在这段时间里，它的亮度有明显的变化，而且有特殊的规律，光变曲线如图5.4.6所示。最亮时2.13等，最暗时3.40等，亮度相差3倍多，最亮的一段时间中央又有一点变暗。这种光变情况用轨道运动很容易解释。对照图5.4.6中A，B，C，D四个位置；位置A时，体积小而光度大的子星被另一个子星挡住了，只有体积大但光度小的子星贡献亮度，总亮度最小；位置B和D时，两颗星同时贡献亮度，

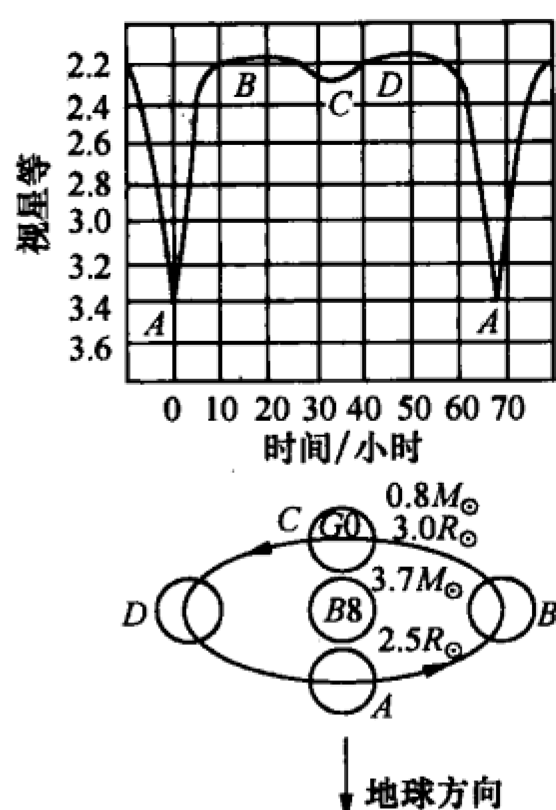


图 5.4.6　大陵五的光变曲线

总亮度极大；位置 C 时，亮子星挡住了一部分暗子星的光，总亮度有一点下降，这样就形成了特殊的光变曲线。大陵五亮度大的子星光谱型 B8，质量 $3.7M_\odot$，半径 $2.5R_\odot$（$R_\odot$ 表示太阳半径）；另一子星光谱型 G0，质量 $0.81M_\odot$，半径 $3.0R_\odot$。两子星相距 0.2 天文单位，距离太阳 88 光年。天文学上通常称双星中亮的一颗为主星，暗的一颗为伴星。两颗子星都绕公共的质心旋转，其运动轨道称为绝对轨道。如果以主星为参考体，只考虑伴星绕主星的运动轨道，称为相对轨道。除大陵五之外，典型的食双星还有渐台二（天琴座 β）、大熊座 W 等。

分析食双星的光变曲线，可以获得两星半径、轨道面倾角及光度比例等比较可靠的数据。1969 年苏联出版的《变星总表》中收有食双星 4 000 多对，但真正研究清楚的只是其中很少的一部分。食双星要求双星轨道面刚好与视线在一个平面上，这毕竟是难得的巧合，所以食双星只占双星很少的一部分。

5.4.3　分光双星和密近双星

一些距离遥远的双星，即使运动到彼此相距最远的位置，两子星在视线方向的张角依然小到望远镜分辨能力的极限以下，所以它们不可能凭光学观测被发现是双星。但如果拍到它们的光谱，有可能从光谱线中判断出那是两颗星的光谱叠加在一起，或者从光谱线表现出周期性的红移和紫移，从而判断出那是一对双星。这样的双星称为分光双星。明显看出是两颗星光谱叠加的叫双谱分光双星，只看到一颗星的光谱，而谱线有周期性红移和紫移的叫单谱分光双星。分光双星中所包含的恒星种类繁多，涉及的物理和演化等问题相当广泛。已发现的分光双星约有5 000多对。

密近双星是指两颗星靠得很近，在相互引力的影响下，有物质在其间交流或出现引力变形的双星。密近双星在恒星世界中普遍存在，研究密近双星可以得到一些重要的恒星演化线索，如分析恒星大气层的结构、恒星内部的密度分布等物理特性，因而是相当重要的研究内容。食双星和分光双星中有很多也同时都是密近双星。密近双星分为三类：仅出现引力变形而没有物质交流的称为不接密近双星（光盘图 5.4.7　不接密近双星）；一颗巨星的物质单方面的流向伴星的称为半接密近双星（光盘图 5.4.8　半接密近双星）；双方都有相互物质交流，你中有我、我中有你的称为密接密近双星（光盘 5.4.9　密接密近双星）。

有一类双星的轨道面接近于与视线方向垂直，在绕转运动中既不会出现交食，也不会表现出光谱线因视向运动而位移，却靠另一种方法能够判断它们是双星。如果用天体测量的方法发现恒星的自行不走直线，而呈螺旋线，即可以推测它与一颗看不见的伴星组成双星。因为有绕转运动，才表现出螺旋式的自行。著名的天狼星伴星就是德国天文学家兼数学家白塞耳用这种方法于 1834 年发现的（光盘图 5.4.10　天狼双星的轨道）。1862 年美国光学家克拉克父子（A. Clark 和 A. G. Clark）用大望远镜终于拍到了天狼星及其伴星的照片（光盘图 5.4.11　天狼星和天狼伴星）。光盘图 5.4.12 是哈勃望远镜拍下的天狼和天狼伴星（光盘图 5.4.12　哈勃望远镜下的天狼和天狼伴）白塞耳还预言过南河三也是一对双星，1892 年也被望远镜证实。用这种方法判定的双星叫“天体测量双星”。

3 颗以上恒星聚在一起的情况也有，如前面提到过的开阳和辅。天文上将 3 颗至 10 几颗恒星聚在一起的称为聚星。离太阳最近的恒星半人马座比邻星，是一组三合星的成员，另外两颗星是半人马座 αA 和 αB（中名南门二），但比邻星与它的两位兄长亮度相差 100 万倍。猎户座大星云 M42 中央，有一组四合星，构成有名的“猎户座四边形”，被称为 M42 的心脏。4 颗星彼此相距约 20 角秒，是用业余级小望远镜能够欣赏的美丽天体（光盘图 5.4.13　猎户座四边形聚星；光盘图 5.4.14　猎户座四边形在 M42 中的位置）。

在太阳周围 17 光年半径的范围内共有恒星 60 颗，其中双星就有 11 对，三合星有 2 组，单星只有 32 颗，占一半左右，其中可能还有一些难以发现是双星的。恒星世界的成员中，一半以上是成双成对或者聚集在小家庭里，像太阳这样的单身汉反而是少数。幸好有这么多成双成对的恒星，才给地球上的天文学家带来好运，可以比较准确地测定一项非常重要的参数——恒星质量，这对宇宙结构和演化的研究是特别有意义的。

5.4.4 由双星测定恒星的质量

4.2.3 小节介绍过用开普勒第三定律推算太阳和行星质量的方法。这一方法同样也适合于双星。考虑到双星中两颗子星的质量差别一般不会像太阳与行星那样悬殊，所以不能用近似公式，而要用准确的开普勒第三定律

$$\frac{a^3}{T^2(M_1+M_2)}=\frac{G}{4\pi^2}$$

式中，M_1 和 M_2 分别是主星和伴星的质量，a 是伴星绕主星运动的轨道半长轴，T 是绕转周期，G 是万有引力常数。T 容易直接测定，a 可以通过测角距及测视差而求得。已知 a 和 T，M_1+M_2 即双星系统的总质量就可以计算了。至于单个子星的质量，需要知道双子星的质量比 M_1/M_2，才能算出。求质量比通常有两种方法，其一是先确定两子星的绝对轨道。所谓绝对轨道指的是每颗子星绕系统

的公共质心运动的轨道。绝对轨道和相对轨道通常是不同的椭圆，但都在同一个平面上。直接从天球上测到的椭圆是相对轨道的投影，称为视椭圆。视椭圆的焦点不一定是相对轨道焦点在天球上的投影。需要经过复杂的计算才能从视椭圆得到相对轨道和绝对轨道。由数学推导知道，相对轨道的半长轴 $a=a_1+a_2$，a_1、a_2 是两颗子星的绝对轨道的半长轴。还可以证明，$M_1/M_2=a_2/a_1$，所以只要求出 a_1 和 a_2，M_1/M_2 就可以知道了。另一种求 M_1/M_2 的方法是通过光谱分析，求得两星视向运动速度曲线，从中得出 M_1/M_2 值。由于过程比较复杂，这里就不赘述了。

对于不是双星的单个恒星，或者虽是双星，但 a 和 T 很难测定，质量大小只能用其他间接的方法测量，精确度就差得多了。

5.5 星团、星云、星际物质

5.5.1 星团

由十几个以上至几百万个恒星聚集在一起的恒星集团，称为星团。深秋至冬夜星空中，沿猎户座腰带和金牛座 α 向右上方延伸，可以见到一团密密麻麻的星，这是肉眼唯一能辨识的星团，称为昴星团，因为它所处的位置属于 28 宿中的昴宿（光盘图 5.5.1 金牛座昴星团位置图）。小说《西游记》中描述过昴宿星君变成一只大公鸡，协助孙悟空打死妖怪蝎子精的故事。昴星团在西方被称为七姊妹星团，是用业余级小望远镜能够观赏的最美丽的天体之一（光盘图 5.5.2 金牛座昴星团 M45）。昴星团有 120 多个成员星，分布范围约 13 光年，距离太阳 400 光年，是银河系中比较年轻的星团。

束缚恒星成团的力依然是引力。从演化角度看，星团有两类：一类是由形成不久，彼此还没有来得及充分散开的年轻恒星组成的疏散星团；另一类是恒星已演化到耆耄之年，重又聚集到一起的球状星团。疏散星团成员星之间的距离比较稀松，多数都位于银河中央平面（银道面）附近，故又名银河星团。昴星团是典型的疏散星团，年龄约 5 000 万年。另一个著名的疏散星团是毕星团，它的几颗亮星都属于 28 宿中的毕宿（最亮的毕宿五即金牛座 α 不是星团成员），距离太阳 140 光年，有 300 多个成员，直径 32 光年，年龄在 4 亿年左右。巨蟹座疏散星团 M44，距离 520 光年，位于 28 宿的鬼宿之中，故称鬼星团（光盘图5.5.3 巨蟹座鬼宿星团 M44）。其他著名的疏散星团有：盾牌座 M11，也称鸭子星团，距离 5 500 光年（光盘图 5.5.4 盾牌座疏散星团 M11）；天蝎座尾钩旁边的 M7，距离 1 240 光年（光盘图 5.5.5 天蝎座疏散星团 M7）；船底座疏散星团 NGC3293，距离 8 500 光年（光盘图 5.5.6 船底座疏散星团 NGC 3293）；船帆

座疏散星团 RCW38，距离 5 500 光年（光盘图 5.5.7 船帆座疏散星团 RCW38）等。目前在银河系中已发现疏散星团 1 200 多个，估计总数约 1 万至 10 万个。由于银道面附近星际尘埃物质较多，减弱星光的作用较强，所以无法看到离太阳很远的疏散星团，但是却能看到邻近星系大、小麦云里的疏散星团。光盘图 5.5.8 是大麦云里的疏散星团 LH95，也是正在诞生恒星的地方（光盘图 5.5.8 大麦云中的疏散星团 LH95）；光盘图 5.5.9 是小麦云里的疏散星团 NGC346（光盘图 5.5.9 小麦云中的疏散星团 NGC346）；光盘图 5.5.10 是小麦云中的疏散星团 NGC265 和 NGC290（光盘图 5.5.10 小麦云中的疏散星团 NGC265 和 NGC 290）。

球状星团成员星多达上万乃至上百万个，非常密集，呈球状分布，直径在 30～200 多光年，星团内恒星的平均分布密度比太阳附近约大 50 倍，星团中心密度大到 1 000 倍左右，是银河系中恒星分布最密集的地方。著名的武仙座球状星团，是北半球最亮的球状星团，在望远镜中犹如一朵盛开的菊花。光盘图 5.5.11 是哈勃望远镜 2008 年 12 月公布的 M13 新照（光盘图 5.5.11 武仙座球状星团 M13）。它由约 30 万颗恒星组成，距离太阳 2.5 万光年。比它还亮的是南半天球半人马座内的 ω 星团，相当于 3 等星的亮度，距离太阳 1.6 万光年，星数达数百万以上。光盘图 5.5.12 是哈勃望远镜 2008 年 4 月公布的 ω 星团新照（光盘图 5.5.12 半人马座 ω 球状星团）。光盘图 5.5.13 是斯必泽望远镜 2008 年 4 月释放的 ω 球状星团红外图像（光盘图 5.5.13 半人马座 ω 球状星团红外图像）。球状星团分布比较广泛，但都距离遥远。因为它们的成员都是老年恒星，在一个膨胀宇宙中，经过长达 100 亿年的旅程，星团与星团之间的距离都被拉开了。估计银河系中约有 500 个球状星团，已被确认的有 200 多个。著名的球状星团还有：人马座球状星团 M22，距离 8 500 光年（光盘图 5.5.14 人马座球状星团 M22）；天蝎座球状星团 M80，距离 2.8 万光年（光盘图 5.5.15 天蝎座球状星团 M80）；天蝎座球状星团 M4，距离 5 600 光年（光盘图 5.5.16 天蝎座球状星团 M4）；杜鹃座球状星团 NGC104，距离 1.5 万光年（光盘图 5.5.17 杜鹃座球状星团 NGC104）（光盘图 5.5.18 NGC104 球状星团的核心部分）；宝瓶座球状星团 M2，距离 3.7 万光年（光盘图 5.5.19 宝瓶座球状星团 M2）；巨蛇座球状星团 M5，距离 2.6 万光年（光盘图 5.5.20 巨蛇座球状星团 M5）；猎犬座球状星团 M3，距离 10 万光年（光盘图 5.5.21 猎犬座球状星团 M3）；大麦云中的球状星团 NGC1850（光盘图 5.5.22 大麦云中的球状星团 NGC1850）仙女座星系 M31 中的球状星团 G1（光盘图 5.5.23 仙女座星系 M31 中的球状星团 G1）等。

与疏散星团主要集中在银道面附近的情况不同，球状星团广泛分布在以银核为中心的球形空间里（图 5.5.24）。有的球状星团到银河系中心的距离已超过银

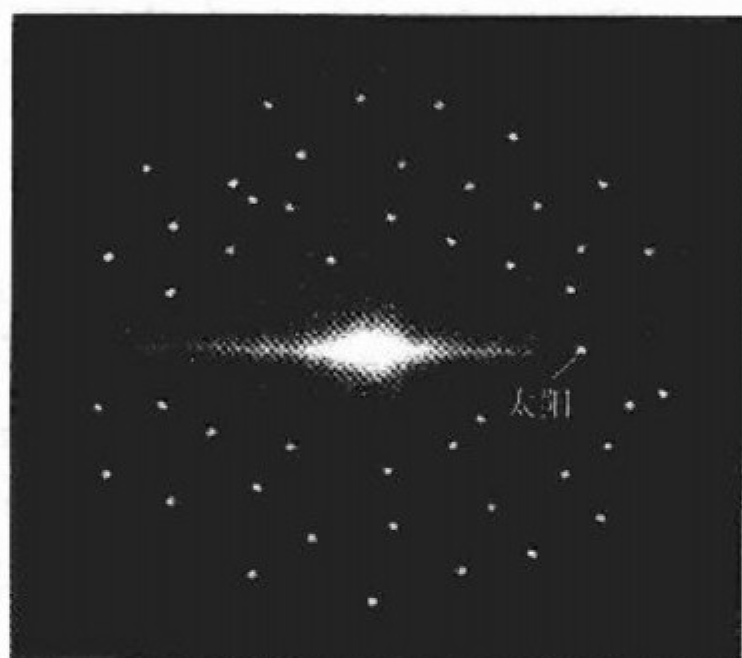


图 5.5.24　球环星团的空间分布

河系边缘至河外星系大麦哲伦星系之间的距离，说明它们已游离到银河系范围之外，成为星系际天体。

5.5.2　星云

在银河系众星之间，有许多非恒星天体，其中一类是弥漫星云。弥漫星云没有明显的边界，平均直径几十光年，形状各异，平均密度为每立方厘米 100～10 000个原子（10^{-21}克）。大多数弥漫星云质量在 $10M_{\odot}$～$1\,000M_{\odot}$，主要分布在银河系内银道面附近。

弥漫星云分为发射星云、反射星云和暗星云 3 种。其实这 3 种星云的物质成分基本上是一样的，都由气体和尘埃组成。如果在星云当中或其附近有高温的大质量恒星，恒星强劲的紫外辐射使星云里面的气体受激而发出荧光，这就是发射星云；如果在星云附近只有较低温度的普通恒星，紫外辐射不够强劲，只能由星云中的尘埃反射恒星的光，这就是反射星云；如果在星云附近没有恒星，气体不能发光，尘埃也无从反光，就成为暗星云。暗星云只能在它身后的亮背景衬托下，显出黝黑的身影。

冬夜星空，猎户腰间参宿三星的左下方有一把佩剑，尖端也有三颗小星。中间那颗其实不是恒星，而是著名的猎户座大星云 M42（光盘图 5.5.25　猎户腰间的佩剑），距离 1 500 光年。在望远镜下有很多明亮的发光气体，延伸达 3 个月亮直径大小（光盘图 5.5.26　猎户座大星云 M42）。麒麟座玫瑰星云 NGC2237 色彩艳丽，酷似盛开的玫瑰，距离 4 600 光年（光盘图 5.5.27　麒麟座玫瑰星云 NGC2237）。人马座三叶星云 M20 也像绽放的花朵，距离 5 600 光年（光盘图 5.5.28　人马座三叶星云 M20；光盘图 5.5.29　斯必泽空间望远镜拍摄的三叶星云；光盘图 5.5.30　加-法-美 3.6 米望远镜 CFHT 拍摄的三叶星云）。在天鹅座里，离天津四不远的地方，有一片红色星云 NGC7000，形状很像地图上的北美洲，称为北美洲星云（光盘图 5.5.31　天鹅座北美洲星云 NGC7000），距离 2 000 光年。在光盘图 5.5.32 天鹅座密密麻麻的群星中可以找到它的身影（光盘图 5.5.32　天鹅座群星中的北美洲星云）。北美洲星云右边的一小片是 IC5067-70 鹈鹕星云，颜色和距离都和北美洲星云相近。天鹅座 NGC6888 又称新月星云，距离 5 000 光年，（光盘图 5.5.33　天鹅座新月星云 NGC6888）。天鹅座中还有一朵鲜花般的星云 IC5146（光盘图 5.5.34　天鹅座 IC5146 星云），距离 4 000 光年，既有发射部分，也有反射部分，中央的亮恒星刚形成不久，年

方10万岁。半人马座弥漫星云RCW79中有几个由尘埃和气体组成的“泡泡”，正吹出热的星风（光盘图5.5.35 半人马座RCW79星云）。人马座ω星云M17，距离我们4 200光年，其中显示有大量的闪光气体（光盘图5.5.36 人马座ω星云M17）。麒麟座NGC2264是结构比较复杂的星云，其中有恒星、疏散星团和黑暗物质，距离2 500光年（光盘图5.5.37 麒麟座星云NGC2264）。星云下边缘上一块黑色V字形缺口，被哈勃望远镜拍得雄伟壮观：黝黑的锥状尘埃柱仿佛一座陡峭的山峰（光盘图5.5.38 麒麟座星云中的锥状尘埃柱）。笼罩四周的红色光环，被顶端几颗年轻的高温恒星照耀着。人马座星云NGC6559，距离5 000光年，有弯曲的条带状黑色尘埃物质（光盘图5.5.39 人马座星云NGC6559）。礁湖星云M8，距离3 900光年（光盘图5.5.40 人马座礁湖星云M8），哈勃望远镜拍摄到的局部细节，展现出明暗强烈对比、色彩艳丽的景象（光盘图5.5.41 人马座礁湖星云细部）。仙后座NGC7635被称为泡泡星云，距离11 000光年（光盘图5.5.42 仙后座泡泡星云NGC7635）。船底座钥匙孔星云NGC3372，距离8 000光年，也有着诡秘艳丽的色彩（光盘图5.5.43 船底座钥匙孔星云NGC3372）。

以上介绍的都是银河系内的星云。一些河外星系中的星云也被观测得相当清楚。大麦云中的魔鬼星云NGC2080，直径50光年，距离17万光年，样子像魔鬼的头（光盘图5.5.44 大麦云中的魔鬼星云NGC2080）。大麦云中的蜘蛛星云NGC2070，真实亮度超过银河系中任何一个星云。如果将其放到猎户座星云的位置，它的光辉将照出地面物体的影子（光盘图5.5.45 地面望远镜拍摄的蜘蛛星云；光盘图5.5.46 斯必泽望远镜拍摄的蜘蛛星云）。N81星云在小麦云中，距离20万光年（光盘图5.5.47 小麦云中的N81星云）。M33是离仙女座星系M31不远的河外星系，距离270万光年，其边缘处有一个庞大的星云NGC604，直径达1 500光年（光盘图5.5.48 M33中的NGC604星云），星云中有200多颗大质量恒星，强劲的紫外线使星云物质激发出明亮的光辉。

反射星云的典型是昴星团云，鲜艳的翠蓝色包裹着整个昴星团（光盘图5.5.49 昴星团云），这张照片是北京巡天会的天文爱好者用20厘米小望远镜拍摄的。仙王座NGC7023疏散星团反射云，以美貌的童话小姑娘爱丽丝命名，距离1 300光年（光盘图5.5.50 NGC7023爱丽丝星云）。猎户座中的气体云NGC1999，距离1 500光年，玲珑淡雅，好像触手可及它那轻柔的质感（光盘图5.5.51 猎户座中的反射星云NGC 1999）。它反射的是猎户座中的恒星V380光。

暗星云中最著名的是猎户座马头星云，距离1 600光年，在玫瑰色背景光的衬托下，显示出酷似马头的黑黝黝的身影（光盘图5.5.52 猎户座马头星云；光盘图5.5.53 猎户座马头星云附近的景色；光盘图5.5.54 更大范围的马头星云与M42合影）。半人马座中的发射星云IC2944，直径1.4光年，其中镶嵌

着一些暗星云，距离 5 900 光年（光盘图 5.5.55　半人马座星云 IC2944）。图中右上角有几组稠密黝黑、被称为“小球状体”暗星云（光盘图 5.5.56　半人马座 IC2944 中的小球状体暗星云；光盘图 5.5.57　小球状体暗星云细部）。仙王座 IC1396 是疏散星团，也是发射星云、反射星云和暗星云的结合体，距离 3 000 光年，图上部黄色区域中的小球状体名为 VDB142（光盘图 5.5.58　仙王座 IC1396 疏散星团与星云的结合体）。

行星状星云是质量较小的恒星演化到晚期形成的星云。当年英国天文学家赫歇尔（W. Herschel）最早发现它时，看似具有太阳系行星的颜色和外形，遂取名为行星状星云，其实这个名称并不确切，不过还是沿用下来了。超新星遗迹星云是大质量恒星的死亡表现——超新星爆发后产生的。对这两种星云的讨论见 9.3 节。

5.5.3　星际物质

银河系中除了恒星和星云之外，还存在着更广泛、密度也更稀薄的星际物质，平均密度不到每立方厘米 1 个氢原子（星云的平均密度为每立方厘米 100～10 000 个原子）。星际物质包括由原子、分子、电子等离子组成的星际气体；由直径小于 0.1 微米的冰、硅酸盐、石墨的小颗粒组成的星际尘埃。星际尘埃是产生星际消光和星际红化的原因（参见 5.1.3 小节）。广义的星际物质也包括各种星云在内。由于银河系空间辽阔，星际物质的总质量约占银河系总质量的 10%。

星团和星云往往用一种代号作名字，如武仙座球状星团叫 M13 或 NGC6205，猎户座大星云是 M42 或 NGC1976。M 是梅西叶天体表的简称，NGC 是《星云星团新总星表》的简称。梅西叶（C. Messier）是 18 世纪法国天文学家，因发现并研究彗星而著名。他把用望远镜观测到的 103 个有可能与彗星混淆的模糊天体登记列表，后人增补至 110 个，称为梅西叶天体表。这 110 个天体中 1/3 以上是河外星系，其余是银河系内的星云、星团，几乎囊括了业余级小望远镜所能看到的全部星团、星云和星系，所以至今仍很受业余天文爱好者青睐，专业文献中也常使用。星云星团新总星表（简称 NGC）及其补编（IC）是丹麦天文学家德雷尔（J. L. E. Dreyer）于 19 世纪末编制的，收录非恒星天体 13 226 个（NGC7840 个，IC5386 个）。美英两国近年联合出版了它的新版，天体位置换算到 2000 年。在本书光盘附录 6 中给出了梅西叶天体表及相应的 NGC 编号。

5.6　不稳定恒星

主序星是处于稳定阶段的恒星。所谓稳定是指恒星处于流体静力学平衡和热

力学平衡状态：在星体内部每部分所受到的引力与压力相平衡；在星体表面每秒钟辐射损失的能量与从内部产生、传递出的能量相平衡。恒星的温度、光谱、亮度、体积和质量都基本上保持不变。

有一类恒星不处于这种平衡状态，上述各种参数存在不同程度的变化，变化的形式可能是周期性的脉动，不规则的迸发或者是巨大的毁灭性的爆炸。这一类恒星称为不稳定恒星。各种变化参数中，最容易直接观测到的就是亮度的变化。凡亮度有变化的恒星都称为变星。亮度变化的原因有真正的物理因素的称为物理变星。有一些恒星的亮度变化并不是恒星本身物理原因引起的，比如5.4节介绍的食双星，虽然也叫变星或“几何变星”，但不属于本节要讨论的不稳定恒星的范围。

从天体演化的角度看，物理变星的“变”与“不变”是相对的。任何时候，没有一颗恒星是绝对不变的。就连最典型的稳定恒星——我们的太阳，也随时都在进行着相当剧烈的变化。随着观测仪器灵敏度的提高，变星和亮度固定的星之间的界限越来越难以明确，对许多原来以为亮度不变的星，现在也发现有亮度变化。从物理机制上说，作为庞大而炽热的气体球的恒星，其内部不断发生着许多物理过程，时刻都处于变化之中。但从宏观来看，恒星通常有能力通过自身的调节维持平衡和稳定：如果产出的能量过多，超过辐射的需求，那么多余的能量会引起星体膨胀，使内部温度下降，产能减少而保持平衡；反之，如果产出的能量偏少，星体就会收缩，使内部升温，促进产能增加，依然保持平衡。微观的动态的平衡维持着宏观的稳定。

变星或不稳定恒星是指在较长时间（几年几天或几小时）内，亮度有明显变化的恒星。“亮度”泛指光学波段及光学波段以外的电磁波辐射的强度。不稳定恒星按物理机制分为脉动变星和爆发变星两大类。至20世纪80年代，已发现和命名的变星有2.8万多个，其中20%为几何变星，爆发变星不足10%，余下大部分都是脉动变星。还发现银河系之外其他星系中的变星1.1万多个。

5.6.1 脉动变星

1. 长周期变星

典型星是鲸鱼座o（中文名刍藁增二）。亮度像人的脉搏一样有节奏的变化，不过节奏比人的脉搏慢得多。变化范围从1.7星等到10星等，周期为320～370天，平均332天。这颗星一年之中有半年在6星等以下，肉眼根本看不见，另外半年逐渐变亮，最亮时1.7星等，有北斗七星那么亮，变幅达8.3个星等，亮度相差约2 000倍。西方人称它为“魔鬼的眼睛”。它是一颗红巨星，直径约为太阳的390倍，离太阳130光年。这颗明灭可睹的红巨星还有一颗绝对星等为8等的白矮星做伴侣，组成一对物理性质迥异的双星，绕转周期是261年。

脉动变星亮度脉动变化的原因是星体有节奏的膨胀和收缩。这是主序星演化到晚期脱离主星序后出现的一种结构不稳定的现象。当亮度较小时有效温度最低，辐射向红外波段偏移，可见光的亮度显得更低。体积胀缩只发生于星体的外层，深层物质不参与胀缩。一般是从距中心 2/5 半径处开始，越接近表层，胀缩幅度越大。胀缩机理类似于热力机械中的气缸活塞（图 5.6.1）。当气缸内外压力平衡时活塞是不动的。如果用强力压紧活塞然后再放开，活塞会向上运动，并因惯性作用而超过原来的平衡位置。上到一定高度后，重力超过缸内压力，活塞又向下运动，同样因惯性作用也超过原来的平衡位置。如果没有任何摩擦损耗，缸内气体就会像弹簧一样体积长期胀缩不已。

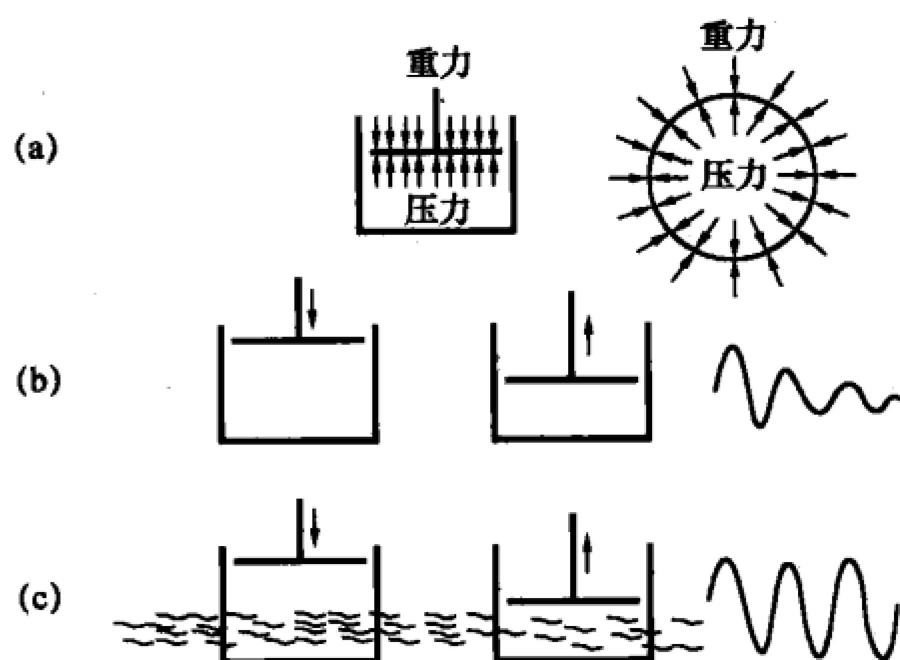


图 5.6.1　脉动变星的活塞模型

长周期变星是脉动变星中数量最多的品种，约占总数的 1/3 左右，光变周期的范围为 70～700 天不等，光变幅度也比较大。它们都是红巨星和红超巨星，光谱型大都属 M 型，少数属 S、N 和 R 型。大部分长周期变星的光变周期和变幅有不规则起伏，变化率可达 15%。

2. 造父变星

典型星是仙王座 δ 星，中文名造父一。造父是春秋时代为周穆王驾马车的一名驭手，因护驾有功赐冠名于天上的一颗小星，即造父一。造父一的光变周期是 5 天 8 小时 46 分 38 秒，像钟表一般准确。最亮时 3.6 星等，最暗时 4.3 星等，变幅 0.7 星等，亮度相差 1.9 倍。图 5.6.2 画出了造父一的亮度、有效温度、视向速度和半径变化的曲线。亮度变化由光度测量，视向速度由光谱测量，都是直接测定值；温度由分光光度测量和维恩位移定律推算出来，半径的变化由视向速度变化推算而得。视向速度的平均值不是 0 而是约 −20 千米/秒，这是造父一向太阳靠近的运动速度，在平均值上下的起伏则是恒星表面膨胀和收缩的速度。比

较这几条曲线可以看出，亮度的最大值并不与半径的最大值相对应，而与温度最大值相对应，也与视向速度的最低值，即膨胀速度最大值相对应。说明亮度变化的主要因素是温度变化，半径变化所起的作用在其次。当然，温度变化的原因归根结底还是半径的变化——恒星体积的胀缩脉动。观测数据表明，温度变化幅度超过 1 000 开，半径变化的范围不到 15%。

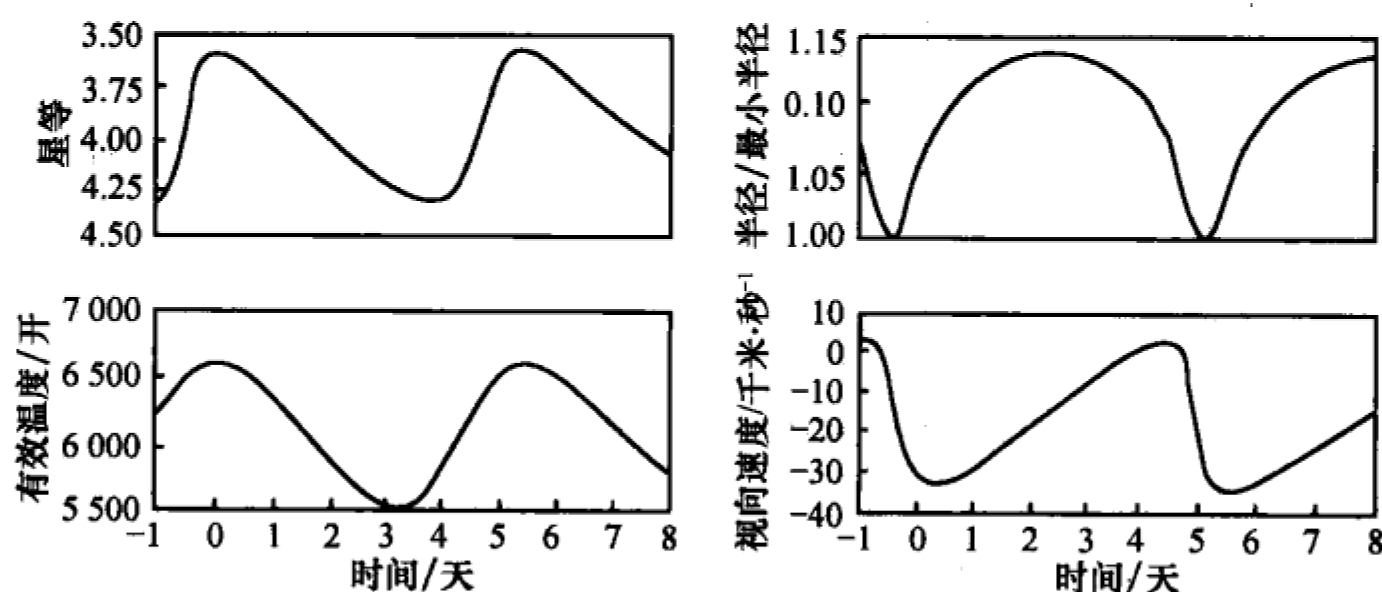


图 5.6.2 造父一的亮度、温度、半径和视向速度的变化

凡变化周期在 1～50 天，而且周期非常稳定的脉动变星都归为这一类变星，命名为“造父变星”。它们是黄色的巨星或超巨星，质量为太阳的几倍至 10 倍左右，光度很大，不仅银河系中有，在许多河外星系中都能观测到。北极星也是造父变星，周期 3.97 天，只是变光幅度很小，不足 0.1 星等。在已发现的脉动变星中，造父变星的数量不足 1 000 颗，只占总数的 5%，其中 700 多颗在银河系内。但是，因为一种非常可贵的特性，使之成为最重要的一类脉动变星。这一特性就是由美国女天文学家李维特（H. S. Leavitt）于 20 世纪初发现的周光关系：造父变星的光变周期越长，光度就越大。她是在研究小麦哲伦星云中的造父变星时发现这一关系的，尽管当时人们还不知道小麦哲伦星云是银河系外面的另一个星系——小麦哲伦星系。周光关系提供了一种简单而又非常重要的测定天体距离的方法：测定光变周期，即得知光度，再根据视星等就可以算出距离，条件为该天体是造父变星。如果星团或河外星系中有造父变星，那么星团或星系的距离也就可以得知了。这一方法称为造父视差法，是测定天体距离在可靠程度方面仅次于三角视差的一种方法，特别适用于遥远的星团和河外星系的距离测定，而对这些天体，三角视差是无能为力的。造父视差法有一个难点就是零点问题或定标问题。周光关系反映的光度值是相对比较值而不是绝对值，确定绝对值需要知道哪怕只有一颗造父变星的绝对距离。遗憾的是所有造父变星都相当遥远，无法用三角视差法精确测定其距离。直到 20 世纪 50 年代，通过对疏散星团的研究才较好地解决了零点问题。造父变星是天体距离的指示器，因此被誉为“量天尺”。

3. 天琴座RR型变星

典型星是天琴座RR星，数量约占脉动变星总数的1/4，光变周期0.05～1.2天，变幅0.5～1.5星等，有比较特殊的光变曲线，因为最初是在球状星团里发现的，故又称星团变星，后来在球状星团以外也发现了许多。这类变星的一个特点是光度相当稳定，绝对星等0.5左右，偏离在±0.2星等范围，所以它们的目视亮度直接指示着距离，被称为第二把“量天尺”，但由于绝对星等较暗，远处的不能发现（造父变星的绝对星等可亮到－7等以上），准确度和适用范围都不如造父变星。

4. 脉动变星的脉动与损耗机制

如前所述，脉动变星的体积胀缩，像气缸里的活塞，往复振动不已。由于摩擦力的存在，活塞的振动逐渐衰减，最终不再振动（图5.6.1 (b)）。在脉动变星中，参与脉动的星体物质也会有一些摩擦损耗，使脉动振幅越来越小，最终停止脉动。但是，实际上各种类型的脉动变星，都没有观测到有振幅衰减的现象，尤其是造父变星，光变周期和振幅都非常稳定。

据理论推算，在没有额外能量补充的情况下，大多数脉动变星经过5 000～10 000次振动以后，就该停止脉动。按造父一的脉动周期计算，一年振动68次，振动100年，即使不停摆也该出现明显的衰减。但它自1784年发现有脉动以来，200多年毫无衰减。究竟是何种额外补给的能量维持其脉动如此经久不衰？这曾是恒星脉动理论中长期未得解决的问题。直至20世纪50年代，在物理学深入研究核反应速率和物质对辐射的不透明度等课题的基础上，苏联数学家热瓦金(C. Жевагин）才给出一种比较合理的解释：在脉动变星的大气层底下，有一层由氢和氦离子组成的电离区，具有与其他区域不同的物理特性；即被压缩时辐射透明度不是增加而是减少。每当恒星收缩时，透明度减少，电离区便保住了来自恒星内部的一部分辐射能量；膨胀时，透明度增加，被保存的能量得以释放出去。随着恒星一胀一缩，这部分能量一份一份地被保存或释放，成为脉动变星自由震荡的补给能量，得以克服摩擦，经久不衰（图5.6.1 (c)）。原来维持脉动的额外能量是恒星内部自身的能量，合着胀缩的节拍，一份一份地供应出来，造就了脉动变星的奇观。这种能量补给方式被称为阀门效应。20世纪20年代，英国著名的天体物理学家爱丁顿曾经想到过“阀门效应”，但因为当时的物理学对辐射不透明度的研究还没有展开，致使他又去寻找别的机制来解释脉动变星，直到去世也未能成功。

热瓦金理论中的电离区必须有足够的厚度，使包含的物质足够多，才能形成有效的“阀门”；电离区又必须离恒星表面不太深，才能使脉动及时得到额外的

补给能量，维持较大的振幅。满足这些条件，脉动才得以维持，丧失这些条件，脉动就会停止。

在恒星演化的漫长历史中，脉动是为时不太长久的阶段性行为。估计在银河系恒星的总数中，处于脉动阶段的约占十万分之一至百万分之一。但脉动变星向辛勤观察它们的人类提供了丰富的宇宙信息，是天文学中地位十分重要的一类天体。脉动变星还有其他一些类型，这里只简要地介绍以上三类。最后，应当提及一位英年早逝的英国聋哑人，最早测定造父变星仙王座 δ 和食双星大陵五变光周期的古德里克（J. Goodricke）。他是一位业余天文爱好者，开创了变星的光度测量工作，去世那年只有 22 岁。

5.6.2 非径向脉动与特殊变星

1. 非径向脉动

已经介绍的恒星脉动是指物理状态随着恒星的胀缩，即半径的变大变小而变化，属于径向脉动的模式。另外还有一类非径向脉动的模式，相当普遍地存在于各类恒星的大气中。这方面的研究开辟了“星震学”这一新的方向。星震学的先导课题是对太阳震动的研究——日震学。太阳不是脉动变星，而且历来被认为是最稳定的一类恒星。20 世纪 60 年代以来，新的太阳观测技术和处理方法发现了太阳上有各种震荡现象。最先发现的是太阳表面任何一点的物质，都存在周期大约 5 分钟的上下振动现象，平均速度 0.5～1 千米/秒，称为“太阳 5 分钟振动”。以后的观测和理论分析表明，太阳 5 分钟振动实际上是 107 个以上非径向脉动模式的叠加。对太阳震动的研究，已使日震学发展成为一门比较成熟的分支学科，揭示出来的关于太阳内部的知识，比过去几百年研究脉动变星积累的知识还要多。星震学也在近几年发展起来，已发现盾牌座 β、金牛座 θ^2 等 17 颗恒星精确可靠的径向和非径向脉动的信息。研究星震对于揭示恒星内部结构有重大意义，就像研究地震可以揭示地球内部结构一样。

2. A 型特殊星

这是一类亮度不变的变星，符号是 Ap。据现代关于变星的广义定义，凡物理性质随时间变化的星（包括几何变星）都叫变星，不一定非得有亮度变化。A 型特殊星亮度没有变化或仅有很小的变化，但其显著的特征是磁场和光谱都有周期性的变化。典型星是猎犬座 α^2，（双星常陈一的一颗子星），它在 5.469 天的周期内磁场强度从＋0.162 特斯拉（1 特斯拉＝10^4 高斯）变到－0.142 特斯拉。另一颗典型星是鹿豹座 53，它的磁场在 7.8 天的周期内，从－0.4 特斯拉变到＋0.4 特斯拉。这类星也叫磁变星。光谱变化表现在一些谱线的强度随磁变周期

而变化。磁场和光谱变化的原因是磁轴与自转轴有较大的倾斜以及不同的元素聚集在表面不同的区域，随着恒星自转，观测者面对的是不同的恒星表面，磁场就呈强弱变化，甚至磁性发生倒转，光谱结构也发生变化。这类星往往含有特别强的金属元素吸收线，有时根据所含金属元素的成分，分别命名为锰星、锶星、铕星和铬星等。

3. 早型发射星

指光谱型属早型（O型或B型）、光谱中有发射线的星，包括WR型（沃尔夫-拉叶）星、of型星、天鹅P型星和B型发射星数种，各有不同的光谱特征。共同的特点是光度都很大，有大量物质从星面逸出，形成很强烈的恒星风。初始质量很大，质量损失也很大。

WR型星是法国天文学家沃尔夫（C. J. E. Wolf）和拉叶（G. Rayer）于1867年发现的。其光谱几乎全部由发射线组成（普通恒星的光谱都是吸收线），较容易鉴别，在银河系与邻近星系中已发现200多颗。它们的绝对星等估计为-4等左右，初始质量在$25M_{\odot}$以上，恒星风造成的质量损失率为（10^{-5}～10^{-4}）$M_{\odot}$/年。这样大的质量损失必定不能维持很久，估计年龄只有几百万年，但已处于主序后的演化阶段，寿命相当短促。典型的沃尔夫-拉叶星WR124位于天箭座，距离1.5万光年，绝对星等-4等，质量$25M_{\odot}$（光盘图5.6.3　沃尔夫-拉叶星WR124）。图中央白点是WR124，周围是它的喷吐物组成的星云M1-67。大犬座头盔星云NGC2359距离1.5万光年，星云中央有一颗吹出大量恒星风的沃尔夫-拉叶星HD56925。新近发现50%以上的沃尔夫-拉叶星为双星结构，如天鹰座沃尔夫-拉叶星WR120。

B型发射星也叫Be星，是意大利天文学家塞奇（A. Secchi）于1866年发现的。其光谱中既有发射线也有较宽的吸收线，而且强度随时间变化，是一种快速自转着的恒星，表面自转速度快到离心力等于或大于重力，所以质量损失也很大，达到（10^{-10}～10^{-7}）$M_{\odot}$/年，绝对星等在-3等～0等之间。最亮的Be星是波江座α（中文名水委一），目视星等0.46等，在我国南方可以看到。Be星被认为是在一个快速自转的中子星（详见8.1节）外面包裹着一圈也跟着自转的气体包层（也叫星周物质），或者是有较多物质交流的密近双星。

大量观测发现，恒星有恒星风物质损失的现象相当普遍，质量越大，损失越大，即使像太阳这样小质量的稳定恒星也有恒星风（太阳风）损失。太阳风的物质损失率很小，约为$10^{-14}M_{\odot}$/年。有严重恒星风损失的恒星，不能以质量守恒为前提建立其结构和演化理论。这向传统的恒星演化理论提出了挑战，成为重要的前沿研究课题。

4. SS433 星

SS433 星是一个很特殊的天体。SS 是星表名称，433 是星表中该天体的序号。该天体位于天鹰座，距离 1 万光年，目视星等 $13^{m}.5$。它也同时是一个射电源和 X 射线源，射电强度有较大的变化。SS433 最奇特之处，是它的光谱中有发射线，而且既有紫移也有红移，同时还有不发生位移的谱线。红移和紫移的程度随时间作周期变化，周期约（164±4）天。按多普勒效应公式计算，它的一部分物质以 5 万千米/秒的速度远离我们而去，另一部分物质又以 3 万千米/秒的速度靠近我们而来。对 SS433 的光谱分析表明它是一个双星系统，其中一个是蓝色巨星，另一个是密度非常高的中子星或者黑洞（详见 8.1 及 10.4 节），周围有强大的引力场。它把伴星的物质吸引过来堆积成盘状，随着中子星或黑洞一道高速旋转，沿着与盘面垂直的方向射出两股高速喷流。观测到的红移和紫移就是这两股气体喷流的发射线，一股远离而去，另一股迎面而来。164 天的周期是喷流方向相对于观察者视线方向的变化。图 5.6.4 是 SS433 双星系统示意图。10.6 节将要介绍的活动星系核的能源机制，与 SS433 有类似的地方。不过 SS433 是银河系内的天体，而活动星系核在银河系之外非常遥远的距离上，质量、能量和活动规模都要大得多。

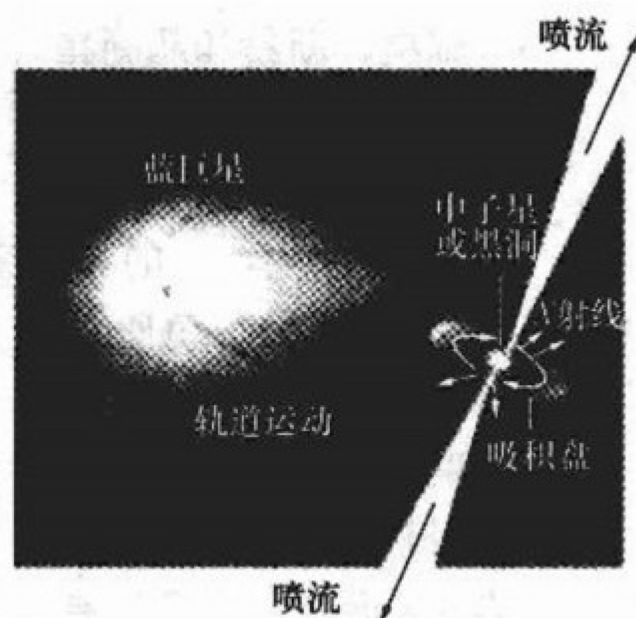


图 5.6.4 SS433 双星系统示意图

5. 船底座 η 星

船底座 η 星是船底座发射星云中的一颗特殊变星，质量 $100M_{\odot}$，距离约 8 000光年。原来为 2～4 等星，1820 年突然喷发，最亮时绝对星等达－14 等，比太阳亮 3 000 万倍，成为当时南半天球最明亮的天体。20 年后，停止喷发，降为 8 等星。20 世纪以来，它再度喷发增亮，目前绝对星等为－11 等（光盘图 5.6.5 船底座发射星云中的船底座 η）。这是一颗只有 10 万岁的年轻恒星，哈望远镜拍到它的照片，正在以 600 公里/秒的速度喷射物质（光盘图 5.6.6 底座 η 正在喷射物质）。光盘图 5.6.7 是钱德拉望远镜 2007 年 6 月释放的船底 η 的 X 图像（光盘 5.6.7 船底座 η 的 X 图像）。

6. 麒麟座 V838 星

2002 年 1 月在银河系边缘的麒麟座方向，距太阳约 2 万光年处，突然爆发一颗特殊变星，光度比太阳大 60 万倍，成为银河系中光度最大的天体，名为麒

麟座 V838。光盘图 5.6.8 是它的位置示意图（光盘图 5.6.8　麒麟座 V838 位置示意图）。它强烈的光辉照亮了原先看不见的周围尘埃物质，范围达 6 光年。从内到外需 3 年时间才能陆续被照亮，反射的光线也在前后 3 年之间先后到达地球。哈勃望远镜拍摄了多幅 V838 的生动照片（光盘图 5.6.9　2002 年 5 月的 V838；光盘图 5.6.10　2002 年 12 月的 V838；光盘图 5.6.11　2004 年 2 月的 V838；光盘图 5.6.12　2004 年 10 月的 V838；光盘图 5.6.13　2005 年和 2006 年的 V838）。与沃尔夫-拉叶星和船底座 η 不同的是，V838 只有体积膨胀而没有恒星风损失。体积最大时直径超过火星的轨道（光盘图 5.6.14　麒麟座 V838 的体积超过火星轨道）。有人认为它是一颗垂死的超巨星，核心质量并不比太阳大，将来的归宿是白矮星加行星状星云。

5.6.3　耀星、新星和超新星

1. 耀星

在很短时间内，星的亮度突然增加，增加率超过每分钟 0.3 个星等的星称为耀星。典型耀星是鲸鱼座 UV 星，距离 8.8 光年，所以也叫鲸鱼座 UV 型星。1948 年，雷登（W. J. Layten）发现鲸鱼座 UV 星在 3 分钟内亮度增加了 12 倍（增亮速度超过超新星爆发，称耀亮）。以后陆续有 200 多颗类似恒星被发现，包括离我们最近的半人马座比邻星。这些星都在太阳周围，距离不超过 20 秒差距（65 光年）。远处的不是没有，而是因为光度很小，不容易观测到。它们都属于光谱型很晚的红矮星，大多为 M 型，少部分为 K 型。

耀星是类似太阳耀斑的恒星突然耀亮的现象，为年轻恒星所特有。虽然耀亮与太阳耀斑有相似之处，但两者之间能量差别很大。一个太阳耀斑释放的能量不超过太阳正常辐射的 1%，而当耀星耀亮时，几分钟内释放的能量超过正常能量 10 倍左右。太阳是一个中年恒星，早已度过了耀亮活动的青年时代。

耀星耀亮的时间没有共同的规律，一般是几小时发生一次，经过几分钟或几十分钟又回复到正常状态。耀亮也伴随着射电辐射和 X 射线辐射同时增强。近年对耀星进行的光学、射电和 X 射线波段的联合观测，表明这三个波段的光变曲线具有如图 5.6.15 所示的相应起伏。X 射线耀亮的时间最短，射电耀亮时间最长。就耀亮开始的时刻而言，射电波段最早，光学波段次之，X 射线波段最迟。耀亮的频率与光度有关，光度越小的星，耀亮越频繁。近年来在一些星云和疏散星团中也发现耀星，如昴星团和猎户座大星云中各有数百颗耀星。

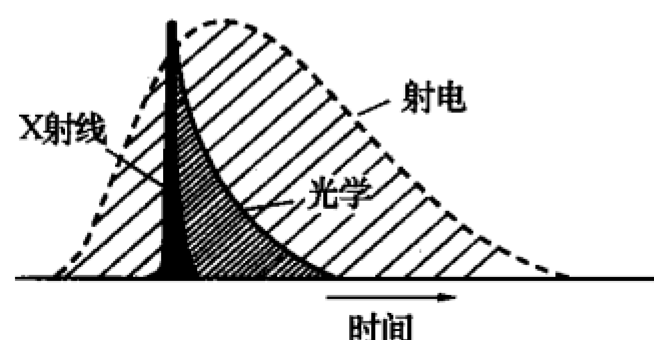


图 5.6.15　耀星的光变曲线

2. 新星

有时在天空中原来没有星的地方，突然出现一颗很亮的星，在 1～2 天中亮度迅速增加，达到极大后又逐渐减弱，在几年或几十年后慢慢消失。这就是“新星”。新星通常最先被业余天文爱好者发现，消息很快传播，非常引人注目，也往往被人误解为是“新”诞生的星。其实恰好相反，它是已演化到老年阶段的恒星，在未发亮之前比较暗，不引起人们注意或者肉眼根本看不见。某天突然变得有 1 等星那么亮。当然，也有很多新星最亮时也需用较大的望远镜才能看见，那就不是业余爱好者所能发现的了。

在我国古代文献中，保存着很多宝贵的发现新星的记录。据考证，17 世纪以前，在中国境内看到的新星有 68 次，如果把出现在日本和朝鲜的也统计在内，共 90 多次。最早的一次是公元前 1300 年左右刻在甲骨片上的新星记录，见图 5.6.16。按竖行从左到右的两行刻有“七日己巳夕□有新大星并火”。火是天蝎座 α（中文名心宿二）在商代时的名称，也叫大火星。西方最早的新星记录是公元前 134 年的“喜帕恰斯新星”，而中国文献对这颗新星记载得比西方更详细，那就是《汉书·天文志》所载：“元光元年六月客星见于房。”客星是汉代对新星的称谓，房是房宿，也在天蝎座。

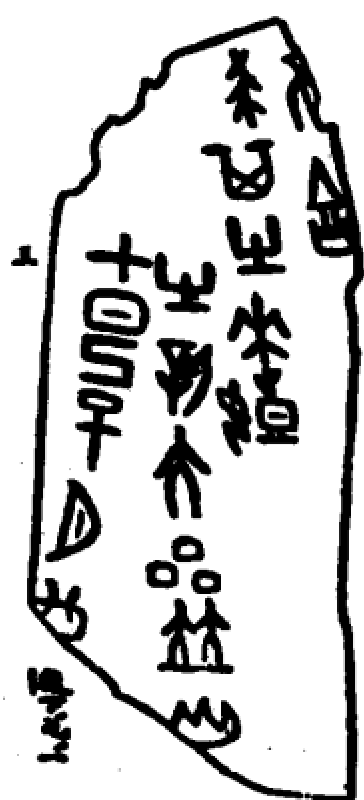


图 5.6.16 甲骨片上的新星记录

现代发现的银河系新星有 270 多颗，邻近的河外星系中也时有发现，估计每个星系每年出现 10～40 颗。20 世纪以来，最亮的新星是 1918 年出现的天鹰座新星，最亮时达 −1.1 星等，超过织女星的亮度；1901 年英仙座新星，1925 年绘架座新星，1934 年武仙座新星，1942 年船尾座新星最亮时都达到 1 等左右。1975 年 8 月 29 日出现的天鹅座新星最亮时（8 月 31 日）达 1.9 星等，接近天津四的亮度，为国内外许多业余爱好者独立发现，到 9 月 4 日，降至 5 等，9 月 15 日降至 6.5 等以下。据专业测量，天鹅座新星的亮度增幅超过 18 个星等，这是前所未有的 9（光盘图 5.6.17　1975 年天鹅座新星爆发前后）。

现代普遍认为，新星爆发出自由一颗白矮星和一颗巨星组成的密近双星。白矮星的核燃料已经耗尽，但引力场很强，在强大的引潮力的作用下，巨星外层的氢被拉向白矮星，在下落过程中，动能转化为热能，使白矮星表面温度升高，积累到一定程度便能引发氢的聚变反应，突然爆发，大量物质被抛射出去，形成一个膨胀着的气壳，亮度急遽增加，这就是观测到的新星。以后气壳逐渐消散，又恢复了原来面目。图 5.6.18 是新星爆发机制的示意图。

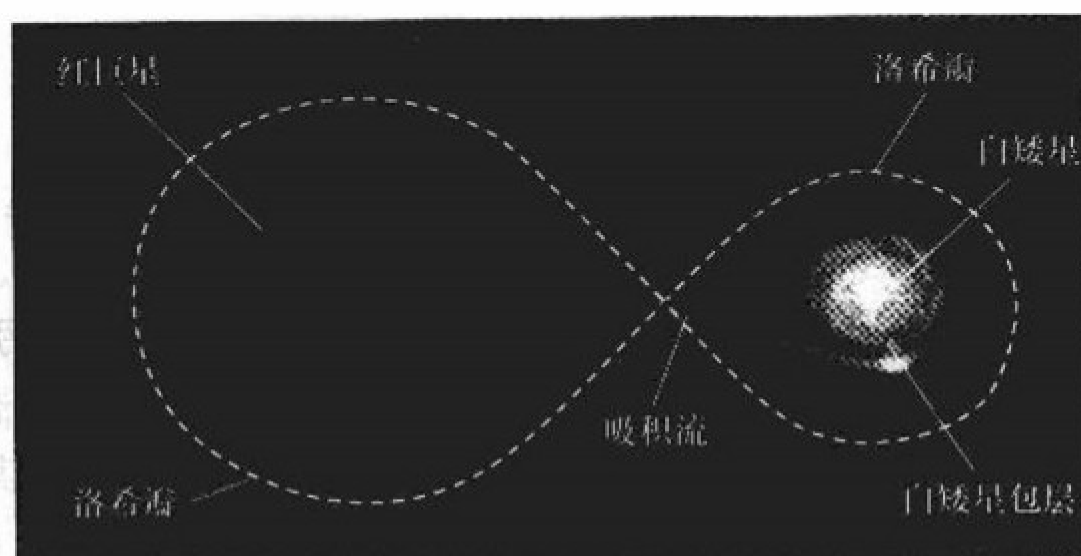


图 5.6.18　新星爆发机制的示意图

有的新星被观测到不止一次爆发，如罗盘座 T、天蝎座 U 和蛇夫座 RS 都已有过 5 次爆发记录。这种再发新星与只爆发一次的新星没有本质上的差别，后者经过很长时间后也许会再次爆发。大多数恒星质量较小，还没有演化到产生新星爆发的阶段。

3. *超新星*

一颗大质量的恒星，演化到最后阶段，核燃料全部耗尽的时候，辐射压力突然消失，只剩下强大的引力，使全部物质在很短的时间里迅速拥向中心，从而引发猛烈的爆炸，亮度急遽增加。爆炸以后，原来的恒星不复存在：或全部质量抛向太空，留下一片弥漫星云，逐渐扩散消失，一切荡然无存；或剩下一部分核心物质，集聚成致密的天体——中子星或黑洞。这就是超新星。

超新星从现象看与新星类似，只是光变幅度更大，超过 20 个星等，亮度突然增加 1 亿倍以上，但在爆发机制上与新星有本质的不同。新星爆发抛出的物质只有太阳质量的千分之一，而超新星爆发抛射出的物质可达太阳质量的几倍到几十倍；新星是星体表面的局部性爆发，而超新星是源于核心的整个星体的爆发；新星是恒星老年的一种表现形态，而超新星是恒星临近死亡时的最后壮举。超新星爆发产生的能量达 10^{46} 焦耳，超过太阳一生辐射能量总和的 100 倍。

银河系中的超新星爆发是非常罕见的天象。从文献记录中被肯定下来的，有史以来只有 9 次，都发生在望远镜发明之前。在我国古代文献中，这 9 次全都有可靠的记录，它们是：

东汉中平二年（公元 185 年），圆规座；

东晋太元十一年（公元 386 年），人马座；

东晋太元十八年（公元 393 年），天蝎座；

宋景德三年（1006 年），豺狼座；

宋至和元年（1054 年），金牛座；

南宋淳熙八年（1181 年），仙后座；

明永乐六年（1408 年），天鹅座；

明隆庆六年（1572 年），仙后座；

明万历三十二年（1604 年），蛇夫座。

这 9 次都在现代天文观测中找到了当年超新星爆发的遗迹。1572 年和 1604 年这两颗分别由丹麦天文学家第谷·布拉赫（Tycho Brahe）和开普勒观测过，所以又叫第谷超新星和开普勒超新星。

公元 185 年超新星，记录在《后汉书·天文志》中："中平二年十月癸亥，客星出南门中，大如半筵，五色喜怒，稍小，至后年六月消。"它的遗迹 RCW 86 也称 G315.4-2.1 星云，距离 8 200 光年，已被 XMM 牛顿和钱德拉 X 射线望远镜发现，照片释放于 2006 年 9 月 18 日（光盘图 5.6.19 超新星遗迹 RCW 86）。全景为牛顿望远镜所拍，局部细节为钱德拉望远镜所拍。

公元 386 年超新星的遗迹星云 G11.2-03，距离 1.6 万光年，钱德拉 X 射线望远镜 2001 年 1 月 10 日释放了它的照片，中央有一颗脉冲星（光盘图 5.6.20 SN386 超新星遗迹）。

公元 393 年超新星的遗迹星云 G347.3-0.5，距离 3 000 光年，钱德拉 X 射线望远镜 2007 年 8 月 8 日释放了它的照片（光盘图 5.6.21 SN393 超新星遗迹）。

最亮的公元 1006 年超新星，除中国文献外，也见于日本、朝鲜、阿拉伯和欧洲的史籍。据资料分析，最亮时目视亮度达到－9.5 等，比天狼星亮 1 600 多倍。我国《宋史·天文志》记载它"状如半月，有芒角，煌煌然可以鉴物"。它的遗迹是射电源 PKS1459-41，2008 年 7 月 1 日哈勃空间望远镜和钱德拉 X 射线望远镜同时释放了 SN1006 遗迹星云的照片（光盘图 5.6.22 SN1006 超新星遗迹光学图像；光盘图 5.6.23 SN1006 超新星遗迹 X 射线图像），形象却大不相同。

最负盛名的超新星是 1054 年北宋仁宗至和元年的"天关客星"。在我国史书《宋史》、《宋会要》和《续资治通鉴长编》中都有明确记载。如《宋会要》："初，至和元年五月，晨出东方，守天关。昼见如太白，芒角四出，色赤白，凡见二十三日。"凡见二十三日是指白天见到它的天数。综合其他史料可知，这颗超新星突然爆发的时间是 1054 年 7 月 4 日凌晨 4 点左右，最后消逝的日期是 1056 年 4 月 6 日，共见 643 天。位置在金牛座 ζ 星（中文名天关星）近旁。在这个位置上，用现代望远镜可以看到有一片蟹状星云，在梅西叶天体表中列为第一号 M1（光盘图 5.6.24 蟹状星云）。1928 年哈勃测量蟹状星云的膨胀速度，表明它在 900 年前集中于一点，从而推断它正是天关客星的爆发遗迹。1948 年发现它正发出强烈的射电，1963 年还发现它是 X 射线源，1968 年又发现它是 γ 射线源，同年在星云中心认证出一颗射电脉冲星 PSR0531＋21（数字含义为赤经 5 时 31 分，

赤纬+21°），1969年又发现它同时是一颗光学脉冲星。射电脉冲和光学脉冲都是中子星的特有表现，证明蟹状星云中心有一颗中子星。这一连串的发现无可置疑地表明：地球上的人类亲眼见到了一颗恒星以一种非常壮烈的方式猛然爆发，走向死亡，残骸化作一片弥漫星云和一颗中子星的全过程。近代天文学围绕蟹状星云的研究论文，在所有专题文献中数量首屈一指。它是第一颗被现代天文观测认证的、古人亲见的超新星遗迹。也是中国古代天象观测在当代天文学研究中发挥独特作用的光辉范例。1054超新星被西方天文界称为“中国超新星”。

南宋淳熙八年（1181年）超新星的遗迹星云，钱德拉X射线望远镜拍到它的照片，有两股X射线喷流。射电源3C58是星云中央的射电脉冲星J0205+6449，距离1万光年（光盘图5.6.25　SN1181超新星遗迹）。

明永乐六年（1408年）超新星，已故前中国科学院北京天文台台长李启斌曾发表论文，认为著名的天鹅座X-1黑洞（详见10.4节）是它的遗迹。

明隆庆六年（1572年）超新星，即第谷超新星，钱德拉X射线望远镜也拍到它的遗迹照片，距离7 500光年，直径17光年的气体云仍以960万千米/时的速度扩张（光盘图5.6.26　SN1572超新星遗迹）。

明万历三十二年（1604年）超新星，即开普勒超新星，钱德拉X射线望远镜也拍到它的遗迹，距离1.3万光年，直径14光年的气体云以640万千米/时的速度扩张（光盘图5.6.27　SN1604超新星遗迹）。

现代天文观测发现银河系中的超新星遗迹共有150多个，绝大多数爆发在人类史前时期，没有文字记载。著名的天鹅座网状星云，又称Veil（面纱）星云，估计是3万年前爆发的超新星遗迹，已经相当分散，NGC6960、6974、6979、6992、6995和IC1350都是它的组成部分，距离地球2 500光年（光盘图5.6.28　天鹅座网状星云NGC6992；光盘图5.6.29　天鹅座网状星云Veil）是天鹅座网状星云的照片。

船帆座超新星遗迹，也称Vela（船帆座）星云，距离800光年，估计是公元前9000年爆发的产物，那时的人类一定看到了这次爆发，但是没能记录下来。（光盘图5.6.30　船帆座超新星遗迹Vela星云）是2007年释放的，有20个满月直径，100光年大小，星云中央发现有脉冲星。仙后座A，是天空中最强的射电源，周围有许多暗淡的星云碎片，经仔细分析，应当是公元1670年前后爆发的一颗超新星的遗迹（光盘图5.6.31　仙后A超新星遗迹星云）。而那时，西方现代天文学已经兴起，望远镜已有相当威力，但无论东方或西方都没有任何观测记录，估计其原因是距离太远（1.1万光年），又被星际暗物质遮掩，爆发时目视亮度较低，没有引起人们注意。

现代望远镜观测到的大量超新星都是河外星系中的超新星，至1999年底已达1 650多颗。1987年2月23日，南美洲智利天文台最先观测到一颗超新星，

位于大麦哲伦星云中，亮度达到了肉眼可见的程度，最亮时有北斗七星那样亮，是1604年以来地球上人类肉眼能见的唯一一颗超新星，被命名为SN1987A。大麦哲伦星云和小麦哲伦星云都在南天极附近，是离银河系最近的星系，也是肉眼直接可见的两个河外星系。欧洲人远航南非和麦哲伦远航南美时才见识到它们，取名为大、小麦哲伦星云，简称大麦云、小麦云。SN1987A爆发，日本神冈、美国俄亥俄、意大利和苏联地下深处的中微子探测器都同时记录到它爆发时释放出来的中微子。这些中微子是从南极穿越地球，经地下到达上述各地的。SN1987A的爆发总能量达3×10^{46}焦耳，超过太阳一生辐射能量总和的300倍。SN1987A是在当代技术条件下看到的距离最近的超新星，机遇难求，许多天文学家赶往南半球，光学、射电、紫外、X射线各个波段综合观测。1990年上天的哈勃空间望远镜也对它进行了追踪观测。光盘图5.6.30是哈勃望远镜拍摄的爆发19年之后的SN1987A照片（光盘图5.6.32　爆发19年之后的SN1987A），两颗亮星之间有一圈亮环，外围还有两圈红色暗环。光盘图5.6.31是大麦云的局部，SN1987A位于图片中央（光盘图5.6.33　SN1987A在大麦云中）。

最后需要强调一下，我们观测到的超新星爆发并不是当时正在发生的事情，而是很久以前的历史事件，因为信号从现场传到我们这里需要很长的时间。比如蟹状星云的距离是6 300光年，1054超新星真正爆发的年代是距今7 200多年之前。大麦哲伦星云距离我们17万光年，现在看到的SN1987A实际上是17万年前发生的一颗恒星临终时的壮烈景象。如果真的能看到当时发生的超新星爆发，地球就该粉身碎骨了，即使是几十光年范围内有超新星爆发，也会导致地球生物的毁灭。关于超新星爆发的物理机制，请见9.3节和9.4节。



第6章　星　　系

啊，银河，
真像天国的河在缓缓流淌，
又如美人的肌肤发着幽光。
我是沿着你游向另一个世界，
还是只能空怀着爱意满腔？

——归劳默·阿波里纳瑞

有人试图不用多普勒效应来解释哈勃的光谱线红移，可是现在并没有支持这种想法的已知的物理事实。人们不得不认为哈勃的发现就是星系的膨胀……看来我们必须认真接受膨胀宇宙这个观念，尽管这个膨胀的宇宙“年龄”不长。

——爱因斯坦，《相对论的意义》第二版

6.1　宇宙岛之争

人类认识宇宙的历程是漫长而艰辛的。当哥白尼推动第一次飞跃，认识到地球只是一颗行星的时候，布鲁诺就大胆指出太阳也只是千万个普通恒星中的一员，并为此付出了被焚死的代价。直到300年后，天文学家第一次测出恒星的距离，布鲁诺的思想才得到确凿无疑的广泛承认。18世纪中叶，瑞典的斯维登堡（E. Swedenborg）和英国的赖特（T. Wright）先后提出天上所有的恒星都和银河是一家，它们共同构成了一个巨大的磨盘一样的天体系统，称为银河系。其后不久，大哲学家康德（I. Kant）在其名著《宇宙发展史概论》中指出，银河系不是唯一的，宇宙中还有无数个像银河系一样的天体系统。此后，历经180年的纷争和曲折，这一光辉思想才得到最后证实。

宇宙岛（德文 Weltinseln）是德国科学家洪堡（F. W. Humboldt）1850年提出的名词。他把康德所说的宇宙中无数个像银河系一样的天体系统，比喻为大海中的小岛，并认为一些天文学家在望远镜中朦胧可见被称为星云（nebula）的云雾状天体，就是许许多多的宇宙岛。这种星云，人类用肉眼明显可见的有两个：位于南天极附近的大、小麦哲伦星云。尽管南半球的居民早已司空见惯，但欧洲人见识它们则是15世纪以后的事。葡萄牙人远航非洲南部海域时称其为“好望角云”。麦哲伦环球航行到达南美洲南端时，看到这两朵美丽的星云，对它

们作了生动的描述。船队回到欧洲以后，人们就把这两块一大一小的星云称为大、小麦哲伦星云，简称大麦云和小麦云（光盘图 6.1.1 南半球星空中的大小麦云)。1612 年，德国天文学家马里乌斯（S. Marius）最先用望远镜发现了北方天空中的仙女座大星云（光盘图 6.1.2 北半球星空中的仙女座星系）。此后，随着望远镜口径增大，成像质量提高，人们发现的云雾状天体越来越多。1781 年梅西叶星表和 1908 年 NGC、IC 星表问世，登记在册的云雾状天体已有 1 万多个。围绕着这些云雾状天体究竟是不是宇宙岛的问题，进行了反反复复的争论。双方各执一词，莫衷一是。其中一个主要原因是没有注意区分混杂其中的两种截然不同的天体：属银河系的星团或弥漫星云以及远在银河之外的星系级天体系统。

早在 1786 年，英国天文学家威廉·赫歇尔观测了 29 个梅西叶天体，发现其中大多数都能分解为恒星，于是他宣布这些“星云”确实是银河系外面的其他星系（即后来所谓的宇宙岛）。其实他观察的这 29 个天体中有 18 个是球状星团，6 个是疏散星团，都不是河外星系；有几个真正的河外星系，他的望远镜尚未具备把它们分解为恒星的能力。1790 年，他在金牛座中观测到一个星云，中间是星，周围是弥漫的云，看似模模糊糊的行星样形状，取名为行星状星云。现在人们已清楚地认识到这是小质量恒星死亡后的遗留物，行星状星云的名称并不确切，不过还是沿用下来了（见 9.3.2 小节）。后来他又观测到许多不能分解为恒星的弥漫星云，于是又否认了自己原先提出过的星云是河外星系的主张。1845 年，英国天文学家帕森斯（W. Parsons）用更大的望远镜分解了许多赫歇尔未能分解的星云，并带动一些人进行观测，星云是河外星系的说法又重新活跃起来。洪堡的“宇宙岛”一词就产生于这一时期。

1864 年，哈金斯（W. Huggins）对星云进行分光观测，发现它们的光谱都是明线光谱，表明了它们的身份是发光气体云而不是恒星。于是宇宙岛之说又遭全盘否定。其实，哈金斯得到的是较亮的银河星云的光谱，那个时代的分光技术还不足以拍到河外星系光谱中的吸收线。1899 年德国天文学家沙伊纳（J. Scheiner）虽然拍到了仙女座大星云的暗线光谱，但却在一片否定宇宙岛的呼声中遭到埋没，未受重视。1912 年美国天文学家斯里佛（V. M. Slipher）拍到昴星团反射星云的暗线光谱，而昴星团肯定是银河系内的天体，这就更加冲淡了仙女座星云有暗线光谱的科学价值。其实昴星团云的暗线光谱是反射附近恒星的光谱，不能表明星云自身的身份，更不能与仙女星系混为一谈。100 多年来，如此反反复复的宇宙岛之争，关键问题是人们没有抓住事物的本质，单靠把星云分解为恒星或从光谱特性来判断宇宙岛的存在与否，理由是不充分的。真正解决问题的办法是测定银河系的大小和河外星系的距离。但是，由于当时测量精度不够，因方法不同而得到的测量结果差异很大，究竟孰是孰非依然扑朔迷离，甚至

演出了一场天文学史上著名的沙普利—柯蒂斯大辩论：时间是1920年4月，地点在华盛顿美国国家博物馆，主持人是美国国家研究理事会主席、威尔逊山天文台台长海尔（G. E. Hale）。柯蒂斯（H. D. Curtis）认为，根据他测出的距离，仙女座星云应远在银河系之外，确实是一座宇宙岛；而沙普利（H. Shapley）坚持说柯蒂斯的距离数字是错误的，仙女座星云没有超出他测定的银河系范围。双方各执一词，辩论不了了之。4年以后，年轻的美国天文学家哈勃发现了仙女座星云和三角座星云中的造父变星，比较准确地测定了它们的距离，确实远在银河系之外。这才肯定了它们确实是银河系以外的遥远星系，从此人们翻开了探索宇宙的新的一页。到20世纪40年代，德国天文学家巴德（W. Baade）把仙女座星云的核心部分也分解为恒星，更进一步证实了它确实是与我们银河系一样的恒星系统。这时，离康德最早提出河外星系的概念已经180多年了。回顾这段历史，天文学家们对宇宙的认识，一方面受客观技术条件的限制，另一方面也不无陈旧观念和思想方法不当造成的影响。今天，天文学家们探测到数以百亿计的星系，"宇宙岛"这一名词已经成为历史，河外星云或仙女座大星云之类的称呼也应正确地改为河外星系或仙女座星系了。人类对宇宙的认识已经触及整个宇宙的结构，它如何诞生，又将如何演化的问题，人类对宇宙的认识，正面临着自哥白尼-牛顿以来的第二次飞跃。

6.2 星系的分类

1926年哈勃最早对星系分类，形成后来通用的哈勃分类：按星系外形分为椭圆星系、旋涡星系、棒旋星系和不规则星系四类。主要的判据是：①中央核球相对于外围圆盘的大小；②旋臂特征；③旋臂或星系盘分解为恒星的程度。

6.2.1 椭圆星系

椭圆星系呈椭圆形或正圆形，没有旋涡结构。通常中央较密，包含一个核，至外围亮度逐渐下降。椭圆星系用字母E表示，后面跟一个表示扁度的数字，其值为$10\times\frac{a-b}{a}$，a和b分别是椭圆的半长轴和半短轴。如果$a=b$，星系是正圆形的，标为E0；E5表示星系长轴是短轴的两倍；最扁的椭圆星系是E7，$a=3.3b$。由于看到的只是投影，所以扁度不一定是星系的真实面貌。看起来很圆，可能并不是球形，也许是扁球形；但看起来扁的就不可能是球形，而一定是扁的。

6.2.2 旋涡星系

旋涡星系具有旋涡结构。中心为一球状或椭球状核球，从中心向外有两条或

两条以上的由亮条或暗条组成的旋臂。旋涡星系用字母 S 表示。根据核球大小和旋臂伸展程度分为 Sa、Sb、Sc 三种次型。Sa 核球最大，旋臂卷得最紧；Sc 核球最小，旋臂最松弛。旋涡星系有较多的气体和尘埃，主要集中于旋臂和星系盘（图 6.2.1）。有少数星系像旋涡星系那样扁平却看不见旋涡结构叫透镜型星系记为 S0 型。

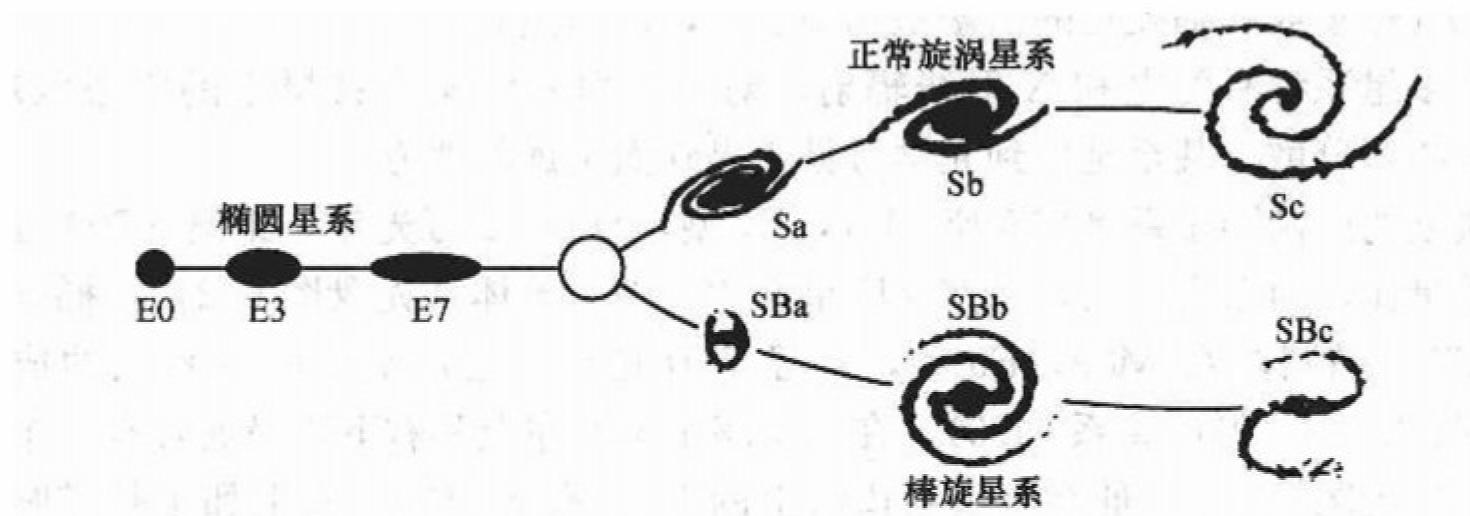


图 6.2.1 星系的哈勃分类

6.2.3 棒旋星系

棒旋星系用字母 SB 表示。除了中心部分不是球状或椭球状而是棒状以外，其余各方面与旋涡星系类似。同样按照旋臂缠卷的松紧程度分为 SBa、SBb、SBc 三种次型。

6.2.4 不规则星系

不规则星系用字母 Irr 表示。它们没有可辨认的核，也没有旋涡结构，形状不对称，有的好像碎裂成几部分。根据其光谱偏重的颜色分为 IrrⅠ和 IrrⅡ两种次型。前者颜色偏蓝，后者颜色偏黄。IrrⅠ中气体含量超过旋涡星系，而尘埃云不显着；IrrⅡ中尘埃云比较明显。IrrⅠ的不规则性好像是固有的，而 IrrⅡ的不规则性由某种扰动引起，如星系核爆发、星系间的碰撞或相互作用等。大、小麦云都属不规则星系。

在已观测到的星系中，不规则星系约占 3%，椭圆星系约占 20%，其余是旋涡星系和棒旋星系。这种统计受观测条件选择性的影响，因为旋涡星系和棒旋星系光度比较大，容易被观测到，占的比例很高，但不一定真的如此。旋涡星系和棒旋星系有时也泛称为旋涡星系，它们的质量通常为 $10^9 \sim 10^{11} M_\odot$，直径 2～20 万光年，与银河系同一量级。银河系也是旋涡星系。椭圆星系质量有大有小，差别较大。超巨椭圆星系可达 $10^{13} M_\odot$，直径 50 万光年；小的只有 $10^6 M_\odot$，0.3 万光年。不规则星系直径较小，一般为 1～6 万光年，质量 $10^8 \sim 10^{10} M_\odot$。

质量、光度和直径都比较小的星系称为矮星系。矮星系数量很多，而光度和质量很大的巨星系是很少的。星系的质量与光度之比叫做质光比。椭圆星系的质光比要比其余类型星系大得多。如椭圆星系 M32 的质光比是 27，而旋涡星系 M31 是 8，NGC6503 只有 0.7，银河系为 10.4。质光比大，说明星系中含有大量对质量贡献大而对光度贡献小的天体，亦即拥有许多徒有质量但发光微弱的成员，如红矮星或濒临死亡的白矮星和中子星，甚至黑洞。

许多星系都有射电和 X 射线辐射。射电辐射有的集中在星系的中心区域，也有的相当分散，甚至延伸到光学可见边界外面很远的地方。

典型的巨椭圆星系是室女座 M87，E1 型，直径 12 万光年，距离 5 700 万光年，质量比银河系大 4 倍，是室女座星系团的中心天体（光盘图 6.2.2　椭圆星系 M87）。椭圆星系 M89，E0 型，直径 7 万光年，也是室女座星系团的成员（光盘图 6.2.3　椭圆星系 M89）。在仙女座星系的左上和右下边缘处各有一个小圆斑（光盘图 6.2.4　仙女座星系边缘上的 M32 和 M110）。左上那个是椭圆星系 M32，E2 型（光盘图 6.2.5　仙女座 M32 椭圆星系）；右下那个是椭圆星系 M110，E5 型（光盘图 6.2.6　仙女座 M110 椭圆星系）。六分仪座椭圆星系 NGC3115，E7 型，直径 4.6 万光年，距离 2 180 万光年（光盘图 6.2.7　椭圆星系 NGC3115）。

Sa 型旋涡星系 NGC300 在玉夫座，距离 750 万光年，光盘图 6.2.8 是斯必泽空间望远镜拍摄的图像（图 6.2.8　玉夫座 NGC300 旋涡星系）。旋涡星系 M83 也是 Sa 型，位于长蛇座，距离 1 500 万光年，光学像由欧南天文台 VLT 望远镜拍摄（光盘图 6.2.9　长蛇座 M83 旋涡星系光学像）；X 射线图像由钱德拉 X 射线望远镜拍摄（光盘图 6.2.10　长蛇座 M83 旋涡星系 X 射线图像）。另一个 Sa 型旋涡星系 M100 在后发座，距离 5 600 万光年，哈勃空间望远镜拍摄（光盘图 6.2.11　后发座 M100 旋涡星系）。猎犬座 NGC4244 具长条形状，距离 4 800 万光年，在 NGC 星表中被列为 Sa 型旋涡星系（光盘图 6.2.12　猎犬座 NGC4244 旋涡星系）。

以下 5 个旋涡星系属 Sb 型：猎犬座 M63，距离 2 400 万光年（光盘图 6.2.13　猎犬座 M63 旋涡星系）；室女座 M104，也叫草帽星系，距离 2 800 万光年（光盘图 6.2.14　室女座 M104 旋涡星系；光盘图 6.2.15　M104 旋涡星系的红外图像；光盘图 6.2.16　M104 旋涡星系的 X 射线图像）；半人马座 NGC4622 距离 3 400 万光年（光盘图 6.2.17　半人马座 NGC4622 旋涡星系）；大熊座 NGC2787，距离 2 400 万光年（光盘图 6.2.18　大熊座 NGC2787 旋涡星系）；大熊座 M81，距离 1 200 万光年，斯必泽空间望远镜拍摄的图像分外美丽（光盘图 6.2.19　大熊座 M81 旋涡星系；光盘图 6.2.20　大熊座 M81 旋涡星系新照）。

Sc型旋涡星系数量较多：猎犬座M51，距离3 100万光年（光盘图6.2.21 猎犬座M51旋涡星系）；后发座NGC4414，距离4 000万光年（光盘图6.2.22 后发座NGC4414旋涡星系）；唧筒座NGC2997，距离5 500万光年（光盘图6.2.23 唧筒座NGC2997旋涡星系）；狮子座NGC3370，距离9 800万光年（光盘图6.2.24 狮子座NGC3370旋涡星系）；波江座NGC1232，距离1亿光年，三色合成的光盘图6.2.25，是欧南台VLT望远镜佳作之一（光盘图6.2.25 波江座NGC1232旋涡星系）；大熊座M101，距离2 700万光年，外形很像银河系，直径比银河系大一倍。光盘图6.2.26是美国国家光学天文台(NOAO)基特峰的4米望远镜拍摄的照片（光盘图6.2.26 大熊座M101旋涡星系）。钱德拉空间望远镜拍到了精彩的X射线图像（光盘图6.2.27 大熊座M101的X射线图像）。不过仔细对照这两张照片，发现旋臂方向相反，是基特峰的光学照片放反了。仙王座NGC6946，距离1 000万光年，其中有许多超新星遗迹（光盘图6.2.28 仙王座NGC6946旋涡星系）。鹿豹座NGC2403，外形华丽，距离1 200万光年，其中也有一些超新星遗迹，与M81属于同一星系群（光盘图6.2.29 鹿豹座NGC2403旋涡星系）。大熊座NGC3184，距离4 000万光年，1998年有过超爆（光盘图6.2.30 大熊座NGC3184旋涡星系）。鲸鱼座NGC1042，距离6 000万光年（光盘图6.2.31 鲸鱼座NGC1042旋涡星系）。巨蛇座NGC6070是一个遥远的星系，距离1亿光年（光盘图6.2.32 巨蛇座NGC6070旋涡星系）。M33也是Sc型旋涡星系（光盘图6.2.33 M33旋涡星系）。天炉座ESO418-008星系被列为S0型，距离5 600万光年（光盘图6.2.34 天炉座ESO418-008星系）；天龙座NGC5866是典型的S0型透镜星系，距离4 400万光年（光盘图6.2.35 天龙座NGC5866星系）。

棒旋星系SBa型以NGC4314为例。它在后发座，距离4 000万光年；地面望远镜拍到全貌，而哈勃望远镜拍到它的核心部分，一圈亮环是由新诞生的恒星组成的（光盘图6.2.36 后发座NGC4314棒旋星系）。棒旋星系NGC1512在时钟座，距离3 000万光年，其内层有一圈亮环（光盘图6.2.37 时钟座NGC1512旋涡星系内环），外面很远的地方又有一圈亮环（光盘图6.2.38 时钟座NGC1512旋涡星系外环）。类似的星系还有被称为轮中轮的Hoag天体，外轮直径约12万光年，比银河系略大。1950年由A. Hoag发现，位于巨蛇座，距离6亿光年。蓝色亮区分布着大质量年轻恒星，黄色的内圈主要由老年恒星组成。光盘图6.2.39是2001年哈勃望远镜拍摄（光盘图6.2.39 轮中轮星系Hoag天体）。飞鱼座AM0644-741也是环状星系，距离3亿光年，环径15万光年，哈勃望远镜公布了它的不同波段的照片（光盘图6.2.40 飞鱼座AM0644-741环状星系）。波江座棒旋星系NGC1300，距离4 600万光年（光盘图6.2.41 波江座NGC1300棒旋星系）；NGC1672和NGC1365，分属剑鱼座和天炉座，

距离都是 6 000 万光年（光盘图 6.2.42　剑鱼座 NGC1672 棒旋星系；光盘图 6.2.43　天炉座 NGC1365 棒旋星系）；飞马座 NGC7479，形象有点特别，距离 1 亿光年（光盘图 6.2.44　飞马座 NGC7479 棒旋星系）；它们都属于 SBb 型。室女座 NGC4535，距离 5 200 万光年，属于 SBc 型（光盘图 6.2.45　室女座 NGC4535 棒旋星系）。

大、小麦云是不规则星系。M82 和 NGC1569 也是不规则星系。M82 在大熊座，距离 1 200 万光年（光盘图 6.2.46　大熊座 M82 不规则星系）；NGC1569 在鹿豹座，距离 700 万光年，哈勃望远镜与钱德拉望远镜拍出了大不相同的图像（光盘图 6.2.47　鹿豹座 NGC1569 不规则星系光学像；光盘图 6.2.48　鹿豹座 NGC1569 不规则星系 X 射线像）。绘架座 NGC1705，距离 1 600 万光年（光盘图 6.2.49　绘架座 NGC1705 不规则矮星系）；玉夫座 NGC7793，距离 1 000 万光年（光盘图 6.2.50　玉夫座 NGC7793 不规则矮星系）；属于不规则矮星系。后发座 NGC 4725 只有一条旋臂，距离 4 100 万光年（光盘图 6.2.51　后发座 NGC 4725）；天龙座 UGC10214，长着长长的尾巴，距离 4.2 亿光年（光盘图 6.2.52　天龙座 UGC10214 怪星系）；算是怪星系，不知属于什么类型。

6.3　星系红移和哈勃常数

1912～1917 年，美国天文学家斯莱弗最先用谱线位移测量了 15 个星系的视向速度。其中只有两个（包括 M31）谱线紫移，表明它们向银河系靠近；其余 13 个都是红移，表明远离银河系而去。哈勃和哈马逊（M. L. Humason）用 2.5 米望远镜测量了更多的星系，发现不仅大多数星系都有红移，而且红移量与它们的距离有关。1929 年，哈勃发表文章提出了著名的“哈勃关系”

$$V = HD$$

式中，V 是视向速度，因为大多数星系都是退行，所以也叫退行速度，D 是距离，H 是常数。通常 D 的单位取百万秒差距，V 的单位取千米/秒，H 的数值称为哈勃常量，单位是千米/(秒 · 百万秒差距)。文章所根据的是 46 个河外星系的谱线红移量，其中 24 个已确知距离，另 22 个可估计距离。最远距离 600 多万光年。在文章结尾处，哈勃审慎地指出：“这种正比关系只是有限距离范围内的初级近似。”此后，哈勃和哈马逊合作，测量了更多更远的星系来扩展“哈勃关系”的适用范围。1929～1931 年，测量距离已推远到 1 亿光年。1948 年帕洛玛山天文台 5 米望远镜落成，他们又把这一距离推远到 50 亿光年，确认哈勃关系依然成立。1953 年，哈勃的“红移定律”重要论文发表在《英国皇家天文学会月刊》上，同年 9 月哈勃辞世，享年 64 岁。哈勃是星系天文学的奠基人，观测宇宙学的开创者，对 20 世纪天文学作出过许多贡献，被尊为一代宗师。当他因“红移

定律”正被考虑获诺贝尔奖时，却不幸离开人世。哈马逊小哈勃两岁，14 岁辍学，修建威尔逊山天文台时当过马车夫和看门人，被海尔台长慧眼看中选做观测助理。他勤奋刻苦，完成了许多重要的天文观测，63 岁时终于成为天文台的研究员，活到 81 岁。现代大量的星系观测资料表明，哈勃关系在可观测的宇宙范围内是普遍成立的。

按照哈勃关系，越是距离遥远的星系，退行速度越大。当速度大到接近光速的时候，简化的多普勒公式 $z=\Delta\lambda/\lambda=V/c$ 不再适用，必须改为按相对论推导出来的严格公式计算

$$z=\sqrt{\frac{c+V}{c-V}}-1 \quad \text{或} \quad V=c\,\frac{(z+1)^2-1}{(z+1)^2+1}$$

按简化的公式，当 $z=1$ 时，退行速度将等于光速 c，而按严格的公式，当 $z=1$ 时，退行速度$=0.6c$。目前观测到的红移较大的星系是 3C256，实测红移量为 $z=1.82$，如果按简化公式计算，退行速度接近两倍光速，超越了相对论的速度限制；而按严格公式计算，退行速度为 $0.78c$。天猫座 Lynx Arc 星系的红移量为 3.4，御夫座 4C41.17 星系的红移量为 3.8，它们的退行速度分别达到了 $0.90c$ 和 $0.92c$。按上述严格公式计算，红移量再大，也不会出现退行速度超光速的现象。

哈勃关系在宇宙学研究中的重大意义在于，它是宇宙膨胀的观测证据。从逻辑推理的角度能够证明：哈勃关系成立与宇宙在均匀膨胀可以互为因果关系，即如果宇宙在均匀膨胀，可以导出哈勃关系；反过来，承认哈勃关系，即证明宇宙是在均匀膨胀。对哈勃关系更深刻的理解应当是：不是星系在空间中做退行运动，而是空间自身在膨胀！曾获诺贝尔奖的美国物理学家温伯格（S. Weinberg）对此有过很好的说明：设有 A，B，C，D，E 个星系，密度均匀地排在一条直线上；因为整个宇宙空间在均匀膨胀，互相之间越来越拉开距离，如果不考虑除此之外它们之间还有别的相对运动，那么无论从哪一个星系看别的星系，必然都在退行，而且退行速度与距离成正比。在图 6.3.1 中，箭头长短代表速度的大小，可见哈勃关系成立。反之，如果哈勃关系成立，至少说明以五个星系为表征的所观测到的宇宙在均匀膨胀着。这种因果关系，无论从哪一个星系看都是一样的，

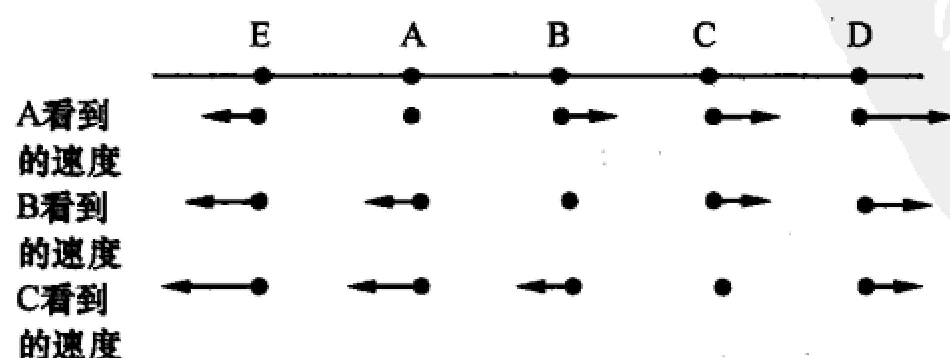


图 6.3.1 哈勃关系示意图

即没有哪一个星系有特殊地位。宇宙没有中心。宇宙膨胀并不要求宇宙一定是有限的，有限或无限都可以，也都可能。即使原本是无限宇宙，也可以从小无限膨胀到更大的无限。对于有限宇宙，哈勃关系没有否定存在一个中心的可能。天文学家们认为宇宙没有中心，至少，把人类所在的银河系当成宇宙中心是不可取的。

人们常用气球被吹胀来比喻宇宙膨胀和宇宙没有中心（图 6.3.2），但是要注意这种图是把现实宇宙的三维空间抽掉了一维。想象人类是气球表面上的动物，他在弯曲的二维空间中，自身也是二维的。当气球膨胀时，他看到所有斑点都在后退，而且越远的退得越快。在整个球面上，没有任何一点是特殊的中心；或者任何一点都可以作为中心。二维的人意识不到第三维，他不可能想象三维空间中有个球心；虽然从三维观点来看，那是球面膨胀的中心。同样的道理，在现实宇宙的三维空间里，人类不可能意识到，在第四维或更高的维度上，有什么宇宙中心。还有一个重要的观点是，我们看到，当气球膨胀时，每一个斑点也跟着胀大。但真实宇宙中，星系的尺度并没有随着空间膨胀而胀大，那是因为星系内部物质之间有引力维系着。同样的道理：宇宙在膨胀，但恒星没有膨胀，地球没有膨胀，我们每个人也没有膨胀。

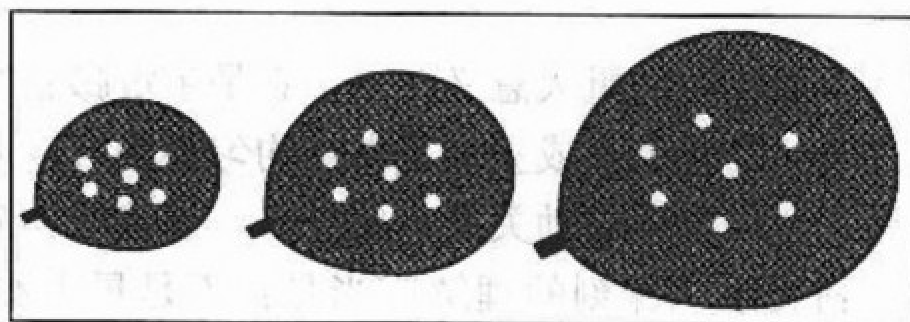


图 6.3.2　用吹气球比喻宇宙膨胀

哈勃常数取何种数值，关系到我们所观测到的宇宙的年龄，即当初所有星系都聚拢在一处的时候在距今多少年之前。如果宇宙从一开始就以均匀的速度一直膨胀到今天，那么哈勃常数的倒数 $1/H$ 就是宇宙的年龄。理由很简单：设 A、B 两个星系之间现在的距离是 D，宇宙诞生之初，它们原本是聚拢在一起的，然后彼此以均匀的速度 V 位移到今天，所费的时间为 T，那么显然有 $D=T\cdot V$，即 $T=D/V=1/H$，T 就是宇宙的年龄。因为 H 是常数，所以这一结论对任意两个星系都是成立的。称 H 为常数，是指对于不同距离处的星系，它们的退行速度与距离之比不变。但宇宙的不同历史时期，显然有不同的哈勃常数值，通常用 H_0 表示现代的哈勃常数测定值。如果认为，宇宙膨胀的速度并不始终是均匀的，在引力的长期影响下，速度有所减慢，也就是说历史上的速度比现在要快一些，而用较快的速度膨胀到现在的规模，时间应当用得少一些，因此宇宙的实际年龄比用现在的 H_0 值计算出来的 $1/H_0$ 要小一些。于是 $1/H_0$ 可看成是宇宙年

龄的上限。而称之为“特征膨胀年龄”。然而，最新的天文观测表明，现在的宇宙正在加速膨胀，说明过去某个时期的膨胀速度比现在慢。那么，将 $1/H_0$ 看成是宇宙年龄的上限就不一定妥当了。“特征膨胀年龄” $1/H_0$ 与宇宙真实年龄之间的关系变得复杂起来。如果宇宙一直减速膨胀，“特征膨胀年龄” $1/H_0$（或称哈勃年龄）将大于宇宙真实年龄；如果宇宙一直加速膨胀，“特征膨胀年龄” $1/H_0$将小于宇宙真实年龄。哈勃本人当年测定的 H_0 值不够准确，从 20 世纪 70 年代以来用多种方法测定的 H_0 值差别也很大，在 55～95 之间。如果取 $H_0=55$，宇宙特征膨胀年龄为 180 亿年；如果取 $H_0=95$，特征膨胀年龄为 105 亿年。准确测定 H_0 值是哈勃空间望远镜的重要目标之一。1999 年 5 月 25 日在美国 NASA 的新闻发布会上，由 27 位科学家组成的一个国际小组宣布：根据哈勃空间望远镜 8 年来对 NGC4603 等 19 个距离一亿光年以上的星系中 800 颗造父变星测定的结果得出，$H_0=70\pm7$；而以著名天文学家桑德奇（A. R. Sandage）为首的另一个小组给出的值为 $H_0=58\pm2$。如果取平均值 $H_0=65$，则宇宙的特征膨胀年龄为 150.8 亿年。2001 年发射的 WMAP（详见 4.2、12.7）的观测和美国大学天文联盟“斯隆数字巡天”（SDSS）国际研究项目相互印证的成果，得出了 H_0 的新值 71 ± 7，宇宙的真实年龄为 137 ± 2 亿年。该项工作被美国《科学》周刊评选为 2003 年全球十大科技成果之首。2008 年 11 月，WMAP 科学团组整理完成了五年工作成果，同时公布了将于 2009 年正式出版的《天体物理学杂志》（ApJS，180）预印本：单用 WMAP 的观测得到的 $H_0=71.9$（$+2.6$，-2.7），宇宙的真实年龄为 136.9 ± 1.3 亿年；而用 WMAP 再加上 Ⅰa 型超新星和 SDSS 的观测综合的结果，$H_0=70.5\pm1.3$，宇宙的真实年龄为 137.2 ± 1.2 亿年。后者应当是迄今为止具有最高可信度的数值（详见 12.8 节）。

哈勃关系不是从理论导出的公式，而是来源于实际测量的经验公式。其实，公式中的速度和距离都不是直接测量出来的，真正直接测量出来的只有光谱线的红移量和星系的视亮度。如果光谱线红移还存在多普勒效应以外其他的原因，那么所谓视向速度的真实性就有问题了。天文学上把因视向速度产生的红移称为宇宙学红移，其他因素导致的红移称为非宇宙学红移。非宇宙学红移是否存在？它们在多大程度上影响着人们对宇宙结构的认识，历来是有争论的热门问题。大多数天文学家和物理学家，包括爱因斯坦在内，都认为哈勃测定的红移是宇宙学红移（见本章开头的引语），有关情况请参阅第 8 章和第 12 章。至于如何从视亮度得出距离的问题，无论从方法还是精度两方面都不是一帆风顺的。哈勃常数的值究竟是多少？从宇宙诞生以来，哈勃常数变化的情况究竟是怎样的？这正是当代天文学研究中至关重要，但还没有完全解决的前沿问题。1998 年《科学》周刊十大成果之首是发现了宇宙在加速膨胀（详见 12.8.3）。$1/H_0$ 所表达的“宇宙特征膨胀年龄”，究竟具有怎样的物理含义，变得愈加模糊了。

6.4 星系的质量和距离

同恒星的情形一样，质量也是星系最重要的一个物理量。星系的质量要比恒星的质量更难测定。5.4 节介绍过动力学方法：通过开普勒第三定律测定双星质量的方法。对于互相绕着转的双星系，也可以用类似的方法。由于双星系的尺度太大，距离太远，绕转运动的时标太长，短时间内的观测很难明确它们之间的运动关系。确定双星系质量的动力学方法，不是从几何角度测量其轨道参数及绕转周期，而是从物理角度测量它们的视向运动速度，比较其差异，再推算质量。更多的时候，测量对象不是单独一对双星系而是一个星系团。先测出星系团的整体质量，再按平均值估计每一个星系的质量。

测定星系质量的另一类动力学方法是应用位力定理。位力定理是 19 世纪德国物理学家克劳修斯（R. J. Clausius）提出来的。对于一个众多分子组成的热力系统，设单独一个分子的质量为 m，它对任一选定的坐标原点的位置向量为 $\boldsymbol{r}$，所受到的各种作用力的合力为 $\boldsymbol{F}$，计算这个向量的内积 $\boldsymbol{r}\cdot\boldsymbol{F}$。全系统所有分子的该内积之和 $\sum\boldsymbol{r}\cdot\boldsymbol{F}$ 称为该系统的位力积，简称位力（virial）。由牛顿第二定律

$$\boldsymbol{F}=m\frac{\mathrm{d}^2\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t^2},\quad \boldsymbol{r}\cdot\boldsymbol{F}=m\boldsymbol{r}\cdot\frac{\mathrm{d}^2\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t^2}$$

考虑到

$$m\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\boldsymbol{r}\cdot\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}\right)=m\left(\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}\right)^2+m\boldsymbol{r}\cdot\frac{\mathrm{d}^2\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t^2}=m\left(\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}\right)^2+\boldsymbol{r}\cdot\boldsymbol{F}$$

对整个系统求和

$$\sum m\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\boldsymbol{r}\cdot\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}\right)=\sum m\left(\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}\right)^2+\sum\boldsymbol{r}\cdot\boldsymbol{F}$$

如果各分子之间只存在引力作用，整个系统为一引力系统，所受的力都是有心力。那么，对于一个稳定的有心力系统，应有

$$\sum m\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\boldsymbol{r}\cdot\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}\right)=0$$

凡有心力都属保守力，$\sum\boldsymbol{r}\cdot\boldsymbol{F}$ 应与保守力系统的势能 U 等价，或写为

$$U=\sum\boldsymbol{r}\cdot\boldsymbol{F}$$

系统内所有分子的总动能

$$T=\frac{1}{2}\sum mv^2=\frac{1}{2}\sum m\left(\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}\right)^2$$

则上述微分式可写为

$$2T+U=0$$

这就是一个稳定的自引力体系经典的动力学公式，称为位力定理，T 是体系内部的总动能，U 是整个体系的总引力势能。

星系是由众多恒星组成的稳定的自引力系统。由万有引力定律，星系的引力势能与质量

的平方相关联

$$U=-\alpha\frac{M^2G}{R}$$

式中，M 是星系的质量，G 是万有引力常数，R 是星系的特征尺度，参数 α 依赖于星系的几何结构，其值可以通过对大量星系样本的统计分析获得，负号表示任何一处的势能总比无限远处低。星系的总动能只与质量的一次方相关联

$$T=\beta M$$

参数 β 依赖于星系内恒星的运动速度分布情况，可通过对星系内不同部分的视向运动速度的观测获得。应用位力定理，可知

$$2\beta M=\alpha\frac{M^2G}{R}\quad 或 \quad M=\frac{2\beta R}{\alpha G}$$

以上是应用位力定理测定星系质量的大致过程。

用动力学方法研究旋涡星系内物质的质量分布，得出一个令人惊异的现象。一个绕轴转动的刚体，各部分的转动角速度是共同的，离转动轴越远的地方，转动线速度越大，速度是距离的线性上升函数；一个自引力系统，如果质量主要集中在中心区域，则在距中心甚远处的物质运动速度服从开普勒第三定律：$r^3\propto T^2$，r 是到中心的距离，T 是旋转周期，距离越远，周期越长，角速度越小。转动线速度 $v\approx\frac{2\pi r}{T}$，不难看出（详见 4.2.3 小节）：

$$v(r)\propto r^{-\frac{1}{2}}$$

转动线速度也随距离的增加而下降。测量旋涡星系从核心至外围各部分的转动线速度，画出以 r 为横坐标，以 v 为纵坐标的 $v(r)$ 曲线如图 6.4.1 所示。称为星系的自转曲线。我们看到，核心区呈直线陡峭上升，因为这里是星系质量集中的区域，转动规律类似于刚体，这是可以理解的。但在远离核心的边缘地带，转动线速度没有随距离的增加而下降，反而保持着平坦不变的趋势，不服从开普勒第三定律。而且通过远红外观测，发现这种趋势一直延伸到离星系很远的地方。这就是前面提到的令人惊异的现象。对此现象的一种解释为：旋涡星

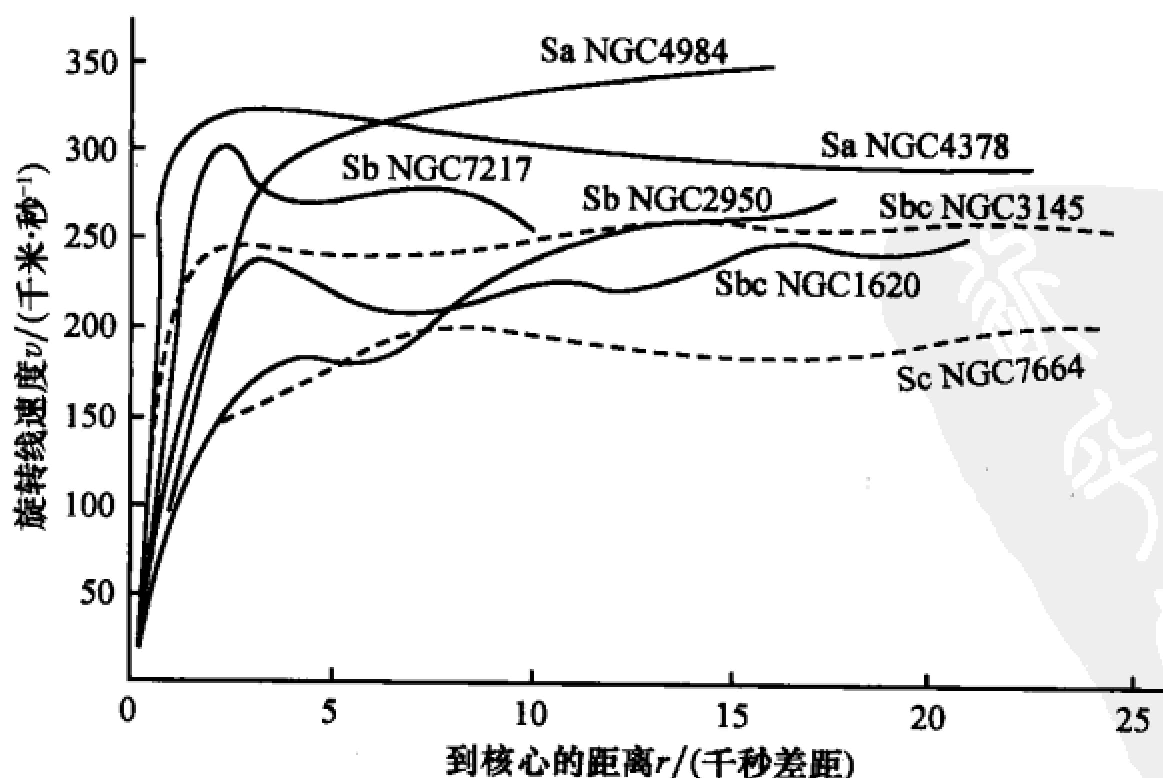


图 6.4.1 一些旋涡星系的自转曲线

系有很大一部分质量不在星系的中心区域，而在边缘区以外很远的星系晕中。那里几乎没有什么恒星，可观测到的发光物质也很少。大多数的质量属于不发光的暗物质。12.8节将会提及，星系外围的暗物质以及整个宇宙中的暗物质，是涉及星系乃至整个宇宙演化的非常敏感的问题。

用动力学方法测出来的星系质量称为引力质量。另一种测定星系质量的方法是建立星系的质光关系，通过对星系的光度测量而获得星系的质量，称为光度质量。5.3.3小节提到过恒星的质光关系，星系的质光关系由已知质量和光度的星系统计资料给出。不同星系的质量/光度比与星系的类型有关，通常椭圆星系的质光比较大（20～40），Sc星系和Irr星系的质光比较小（小于10）。

关于星系质量，还有一个令人惊异的现象是，对同一个星系，测定出来的引力质量总大于光度质量。这是暗物质存在的又一个观测证据，因为光度质量测量出来的只是发光物质的质量；而引力质量是发光物质与暗物质加在一起的质量。暗物质成为在宇宙中游荡的幽灵，似乎尺度越大，暗物质占的比例越多。有人估计，暗物质的总质量可能比看得见的物质多很多倍。暗物质的存在不仅增强了宇宙大尺度上物质分布的均匀性，而且成为支配宇宙运动和演化的的决定性因素之一。

星系距离的测量同恒星距离的测量一样是非常重要但又非常困难的任务。天文学的发展历史上几次重大争论，关键问题都在距离因素上。恒星视差是否存在（见1.3节），宇宙岛之争（见6.1节），类星体之谜（见8.2节）以及当代的γ射线爆问题（见10.7节）莫不如此。每当天文学家找到一种测量更远天体距离的新方法，天文学研究就跃上一个新的台阶。

在第5章我们已经介绍过测量恒星距离的一些方法：三角视差法、分光视差法、造父变星法和星团变星法。对于星系，前两种方法已经失效，造父变星法仍可使用，测量范围一直延伸到15兆秒差距。在银河系之外相当大的空间领域里，造父变星法是一种相当有效的方法，但对于更加遥远的星系，因为很难辨认出其中的造父变星，也逐渐失效。一些新的测定距离的方法综合在（图6.4.2）中，那里给出了天文学测定不同层次天体距离的各种方法。越接近宝塔形的顶层，测量精度越高，但测量范围越小。对太阳系天体的雷达测距，精度可达10^{-10}；对邻近星系的测距精度为10%左右；对非常遥远的星系，测距精度降至50%甚至更糟。

图6.4.2中的T-F方法是1977年由天文学家妥瑞（R. B. Tully）和费舍尔（J. R. Fisher）提出的。他们发现星系的光度与自转速度有关。光度既是测量光度质量的重要依据，光度与视亮度相配合也提供可靠的距离信息。自转速度表现在谱线展宽的多普勒效应上：旋涡星系自转时，一部分物质快速远离，谱线有红移；另一部分物质快速靠近，谱线有紫移，叠加后，谱线就展宽了。他们用射电方法测量中性氢21厘米的谱线宽度，换算成自转速度，再得出光度，距离就可以知道了。中性氢主要分布在星系外围的暗晕中，所以他们是通过测旋涡星系暗

	相对精度	适用范围	
雷达	10^{-10}	40天文单位	太阳系内
Δ视差	10^{-5}	100秒差距	邻近恒星
分光视差	10^{-2}	100千秒差距	遥远恒星
造父变星	10^{-1}	15兆秒差距	星团和邻近星系
Ia型超新星	0.1～0.2	100兆秒差距	遥远星系
T-F，F-J方法	0.2	200兆秒差距	遥远星系
红移与哈勃关系	0.5	15吉秒差距	更遥远星系和星系团

图 6.4.2 测定天体距离的方法

晕中的物质运动速度来推算星系的光度和距离的（关于中性氢 21 厘米谱线的详情，见 8.4 节）。

T-F 方法的测量精度约为 20%，而且只适用于旋涡星系。椭圆星系旋转很慢，速度测定较难，外围也缺少中性氢物质，T-F 方法不能使用。但与 T-F 方法几乎同时，天文学家法博（S. M. Faber）和杰克逊（R. E. Jackson）找到了适用于椭圆星系测距的 F-J 方法。他们发现椭圆星系中心部分的自转速度弥散度与星系的光度之间有相关关系，通过速度弥散度的测量可以得到星系的光度从而算出距离。

通过 Ia 型超新星测距到 9.3 节再作介绍。通过哈勃关系测距在 6.3 节已经介绍过了。20 世纪 90 年代以来，由于望远镜口径的加大，测光技术的敏感程度和精确度的提高，大大延伸了发现 Ia 型超新星的距离。通过 Ia 型超新星测距成为更遥远星系测距的重要方法（详见 12.8 节）。

除了图 6.4.2 列出的测距方法之外，还常应用两种估计天体距离的方法，就是最亮恒星法和最亮星系法。前者认为不同星系中的最亮的恒星应当具有大致相同的光度，后者以为不同星系团中最亮的星系也应具有大致相同的光度。从估计出的光度与实测的视亮度相比较，便可得到距离。再者，如果知道天体的固有线直径（如一些较亮的星系），通过测量其角直径也可获得距离；如果知道天体的固有运动速度，通过测量其角位移速度（即天体的自行）也可获得距离。前者称为“角直径距离”，后者称为“自行距离”。这些方法的准确性当然不甚可靠，只能是一种没有办法的办法。即物穷理，求索未知。天文学家总是知难而进，想尽一切办法测知遥远天体的真实距离。只有知道了真实的距离，才能建立起宇宙中各种天体及天体系统的分布架构，然后再去解开神秘宇宙中的种种谜团。

6.5 本 星 系 群

用统计方法分析星系的分布，发现它们有集结成大小不同的集团的倾向，孤

立的星系仅占少数。也许全部或绝大多数星系都属于某个星系集团。那些看似“孤立”的星系可能是某个遥远的星系集团内最亮的成员，其余较暗的成员没有被看到而已。

三五个彼此靠近、有物理联系的星系组成的小团体称多重星系。由十几个或几十个星系组成的比较松散的集团称为星系群（group of galaxies）；上百至上千个星系组成的大家族称为星系团（cluster of galaxies）。另有一种说法不区分星系群或星系团，而将成员数目很多的称为富星系团，数目较少的称为贫星系团。

银河系与大、小麦云组成三重星系，而它们又同其他大约 40 个星系组成一个星系群，称为本星系群。

大麦云（光盘图 6.5.1　大麦云）的直径是银河系直径的 1/3，距离银河系约 17 万光年。在银河系与大麦云之间刚好能再放下一个银河系加一个大麦云。小麦云（光盘图 6.5.2　小麦云）的直径是银河系直径的 1/5，距离银河系约 20.5 万光年。大、小麦云的质量分别是银河系质量的 1/100 和 1/300。在大、小麦云中观测到各种光谱型的恒星以及星团、星云、X 射线源，襁褓中的恒星以及迈向死亡的超新星和超新星遗迹，包括著名的 SN1987A（参见 5.6）。这两个银河系的小兄弟对地球上的人类来说，无论在恒星世界还是星系世界的研究中都占有重要的地位。大、小麦云中含有大量星际气体，在银河系的引力作用下，一部分气体伸向银河系，形成连接这个三口之家的“气体桥”（光盘图 6.5.3　大、小麦云与银河系之间的气体桥）。1975 年，有人用 21 厘米射电观测宣称发现在离银河系约 5.5 万光年的近处有一个小兄弟，叫做比邻星系，但没有被光学或红外观测证实。

在本星系群中，M31（光盘图 6.1.2）排行第一，银河系第二，老三是 M33，其余都是暗弱的矮星系，簇拥在三个大星系周围。M31 距离银河系约 290 万光年，亮的可测部分直径约 20 万光年。天气特别好的时候，用肉眼勉强可以看到它暗淡的身影。光盘图 6.5.4 指示它在星座中的位置（光盘图 6.5.4　M31 在星座中的位置）。M31 是旋涡星系，Sb 型，可能有 7 个小椭圆星系陪伴着它，组成一个 8 重星系。M31 的形状和结构都和银河系相似，外围有大量暗物质组成的晕，总质量约为银河系质量的 2.5 倍。在 M31 中已发现 300 多个球状星团、400 多个疏散星团、500 多个行星状星云、700 多个尘埃云。M33 位于三角座，Sc 型，距离银河系约 300 万光年，直径约 6 万光年，质量只有银河系的 1/80（光盘图 6.5.5　M33 旋涡星系）。

本星系群的一些主要成员见（表 6.5.1）。视向速度是负值的，都向银河系靠拢运动，光谱线有紫移现象。本星系群的直径约 400 万光年。星系群中星系的尺度与星系与星系之间的尺度相比约为一比几十；而星系中的恒星的尺度与恒星之间的距离相比为一比几百万，相差悬殊。但星系群的物质平均密度比星系的物

质平均密度要低得多（光盘图 6.5.6 本星系群的空间分布图）。本星系群的物质平均密度为 15 个粒子/米^3，银河系银盘部分的物质平均密度为 10^7 个粒子/米^3。

表 6.5.1 本星系群部分成员

星 系	类 型	距离万秒差距	直径万秒差距	质量/$M_\odot$	视向速度
大麦哲伦云	IrrI	5.5	0.92	2×10^{10}	+13
小麦哲伦云	IrrI	6.4	0.77	6×10^{9}	−30
M31	Sb	89.0	6.00	4×10^{12}	−59
M32	E2	89.0	0.25	3×10^{9}	+35
M110	E5	89.0	0.52	1×10^{10}	−1
M33	Sc	92.0	1.84	2.5×10^{10}	+3
NGC147	E5	73.6	0.32	1×10^{9}*	+89
NGC185	E3	70.6	0.30	1×10^{9}*	+39
IC1613	Irr	89.0	0.4*	2×10^{8}*	−125
NGC6822	Irr	55.2	0.17*	3×10^{8}*	+66
玉夫星系	E3	8.6*	0.24*	3×10^{6}*	+162
天炉星系	E2	15.3	0.62*	2×10^{7}*	+53
狮子Ⅰ星系	E3	27.6	0.18*	3×10^{6}*	+168
狮子Ⅱ星系	E0	23.0	0.13*	10^{6}*	+16*
天龙星系	E0	8.6	0.10*	10^{5}*	−31
小熊星系	E4	7.4	0.24*	10^{5}*	−88*
IC10	Irr	128.8	—	—	−83
NGC3109	Irr	138.0	—	—	+131
人马星系	Irr	128.8	—	—	−19.5
船底星系	E3	11.0	—	—	229
仙女Ⅰ星系	E3	92.0	—	—	—

* 表示较早期的数据。

因为人在银河系中只活动于一个很小的范围，所以对银河系的整体情况，特别是它的外貌形态，反而不如对邻近的河外星系看得那样清楚。地球上的观测者通过光学波段只能看清太阳附近的一个小的局部，大部分区域为星际暗物质遮掩。1918 年，美国天文学家沙普利通过对球状星团的观测研究，认识到银河系为扁平形状，而太阳处在银河系中比较靠边的位置。第二次世界大战以后发展起来的射电天文学，利用氢的 21 厘米谱线观测技术，认识到银河系的旋涡结构性质属 Sb 类型。如果从几百万光年以外观察银河系，它的外形很像地球上拍到的大熊座 M101 星系照片（俯视）（光盘图 6.5.7 大熊座 M101 星系）和后发座 NGC4565 星系照片的（侧视）（光盘图 6.5.8 后发座 NGC4565 星系）。

银河系的结构如图 6.5.9 所示，中央的椭球状隆起部分叫核球，横径 1.2 万

光年，直径1万光年。核中有许多老年恒星，红外辐射特别强。核球中恒星的分布密度比太阳附近要高得多。如果我们居住在位于核球中某个恒星的行星上，就会看到夜空中有几百万颗比天狼星还亮的恒星，夜空几乎和白天一样亮。

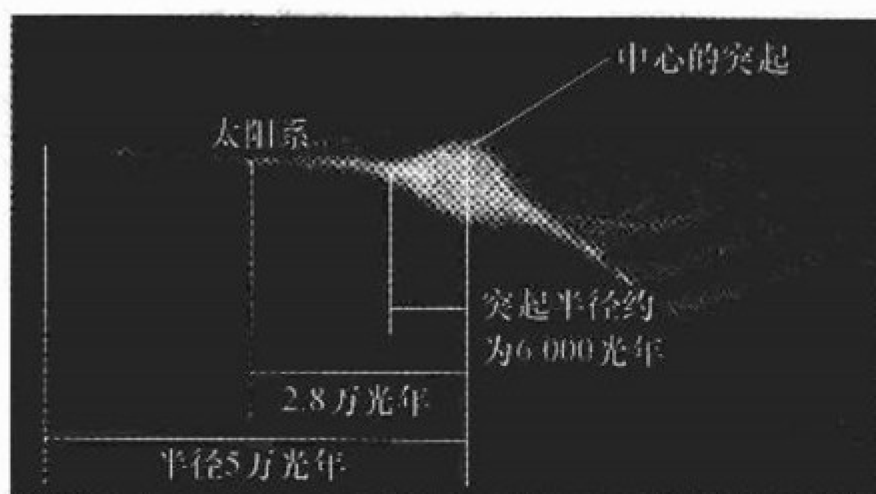


图 6.5.9　银河系的结构示意图

从核球向四面八方伸展出去，由恒星组成的盘状结构叫做银盘。银盘的直径约10万光年，厚5 000光年。银盘的中央平面称为银道面，高温的O、B型恒星集中在银道面附近，分布密度很高；银道面上下两侧离银道面渐远处，恒星逐渐稀疏，温度也有所降低。银盘内的恒星镶嵌在气体和尘埃之中，气体和尘埃在直径和厚度两方面都比恒星盘更大，而且越靠边缘处越厚，与恒星盘越靠边缘处越薄正好相反。银道面是气体和尘埃最浓密的地方。

银河系中的恒星们分两大族群：星族I和星族II。银盘内的大多数恒星属于星族I；核球中的恒星主要属于星族II；而银核中又有许多星族I恒星。天文学中习惯把氢和氦以外的所有元素统称为重元素。星族I恒星重元素的含量比较高，占1%～2%，星族II恒星重元素的含量不到万分之一。通常称星族I恒星为富金属星，星族II恒星为贫金属星。金属的贫富程度用氢原子核与铁原子核的数量之比来衡量。星族I恒星是新生代恒星，包括第3代或第4代恒星，年富力强；而星族II恒星是老一代，甚至是第1代恒星，明显苍老。疏散星团里主要是星族I恒星；球状星团里主要是星族II恒星。疏散星团里最亮的星是高温的蓝、白色超巨星；球状星团里最亮的星是低温的红色超巨星。深入的研究将恒星按年龄分成5个星族，太阳属于星族I中的盘族恒星。

银核是深深地隐藏在核球中央的一个大约直径10光年的中心部分，这里聚集着一大批年轻的大质量蓝巨星。恒星的分布密度约为太阳附近的20万倍。银核区的总质量相当于1 000万个太阳的质量。从地球上看，银核的视直径应和木星一般大，如果没有气体和尘埃物质的遮挡，银核的亮度将超过满月，成为夜空中最亮的天体，仅次于白天的太阳。可惜情况并非如此，因为气体和尘埃物质大量存在。银核区的恒星以高速绕银心公转，银心是银核的中心。据红外观测得

知，距银心 0.015 光年处，公转周期为 16 年，距银心 0.004 3 光年处，公转周期只有 2.8 年。而太阳绕银心公转的周期长达 2.7 亿年。银心是强射电辐射区，称为人马 A 射电源。其中隐藏着一个有几百万太阳质量的巨型黑洞（详见 10.5 节）。由于气体和尘埃的严密包裹，银核区是光学观测的盲区，人们靠射电和 X 射线方法进行观测。以下几张银核区的图像都是钱德拉 X 射线空间望远镜提供的。光盘图 6.5.10 是银核区 900 光年×400 光年范围天体分布图（光盘图 6.5.10　银核区 900 光年×400 光年范围图）。光盘图 6.5.11 是银核区 890 光年×640 光年范围的红外图像（光盘图 6.5.11　银核区 890 光年×640 光年范围红外图像）。光盘图 6.5.12 是银核区 70 光年×70 光年范围的图像（光盘图 6.5.12　银核区 70 光年×70 光年范围图）：人马 A 细分为两个，人马 A 东和人马 A 西；人马 A 东直径 19 光年，涵盖着人马 A 西，人马 A 西直径 5.7 光年。真正的银河系核心在人马 A 西中，标记为人马 A＊。光盘图 6.5.13 是银核区 10 光年范围的特写（光盘图 6.5.13　银核区 10 光年范围特写），可见白色的高温气体和 1.5 光年长的喷流。光盘图 6.5.14 是银核区 16 光年×16 光年范围的红外图像（光盘图 6.5.14　银核区 16 光年×16 光年范围红外图像）光盘图 6.5.15 给出人马A＊周围 4 个 X 射线变源（光盘图 6.5.15　银核区 4 个 X 射线变源）。光盘图 6.5.16 是银核区弧状结构，图中的白色亮区是人马 A＊所在处（光盘图 6.5.16　银核区弧状结构）。

银河系是旋涡星系，银盘中有 5 条旋臂。太阳位于猎户臂内侧，距离银心 2.8 万光年，在银道面以北约 39 光年。从太阳处看过去，在银心方向（银心的坐标为 $\alpha=17^{h}45^{m}.6$，$\delta=-28°56'$，位于人马座）有人马臂和南十字臂，在反银心方向有英仙臂。英仙臂距离银心 4 万光年；人马臂距离银心 2.3 万光年；南十字臂距离银心 1.3 万光年（光盘图 6.5.17　银河系旋臂示意图）。旋臂中的物质相对集中，密度约等于旋臂以外区域的 10 倍。旋臂中有大量的高温蓝色恒星、年轻的星团、弥漫星云，也有星际气体和尘埃物质。

银盘以外是一个范围广大，近似球形的区域，叫做银晕，直径约 30 万光年。银晕中可观测到的物质分布密度比银盘中要低得多，球状星团在银晕中有比较广泛的分布。已发现的 200 多个球状星团，有 160 个分布在银晕中（光盘图 6.5.18　银晕中球状星团的分布示意图）。银晕中还有少量主要属于星族 II 的离群的恒星。银晕中隐藏着大量观测不到的暗物质。范围辽阔的银晕之内，银盘以外的总质量超过银盘以内。银晕外面还有物质密度更低的银冕，大致呈球形，直径估计为 68 万光年。最近 10 年的一些观测显示，银河系的核球也许不是椭球，而是一条棒；银河系的总体结构也许不是车轮状的旋涡星系，而属于棒旋星系的类型。

2008 年 6 月，根据斯必泽望远镜的观测资料画出一张新的银河系旋臂示意

图（光盘图 6.5.19　新的银河系旋臂示意图），认为银河系只有两条主要的旋臂：盾牌-半人马臂（即南十字臂）和英仙臂，其余都是较小的旋臂；银河系中心区属棒状结构，棒长 2.7 万光年，与太阳-银心连线相交约 44°角。

旋涡结构是星系中一种相当普遍的现象。在所有能观测到细节的星系中，有旋涡结构的占 60%以上。旋涡结构外观上给人一种神秘的动感的美。但旋涡结构的实质是什么？是星系中的恒星都沿着旋臂在大规模地缓缓列队运动吗？天文学家们苦苦思索了几十年。20 世纪 60 年代，两位华裔美国天文学家林家翘和徐遐生终于揭开了谜底。他们用 1942 年由瑞典天文学家林德布拉德（B. Lindblad）提出的“密度波”理论较好地解释了星系中的旋涡结构。密度波是由恒星的密集程度显示出来的一种波纹图案。众多恒星绕星系中心旋转，但旋臂并不是它们具体的转动路线。单个恒星的转动路线是封闭的椭圆轨道，但大量恒星的集体行动受星系中某种引力势的扰动有时被迫趋于集中，有时又趋于疏散，这样便构成了旋涡图案。石击水面时，水面的波纹不断扩散，但每一个水分子只是上下运动，并没有向波纹扩散的方向运动。密度波的形成与此有类似的地方。由密度波造成的星系旋涡结构示意图见图 6.5.19。

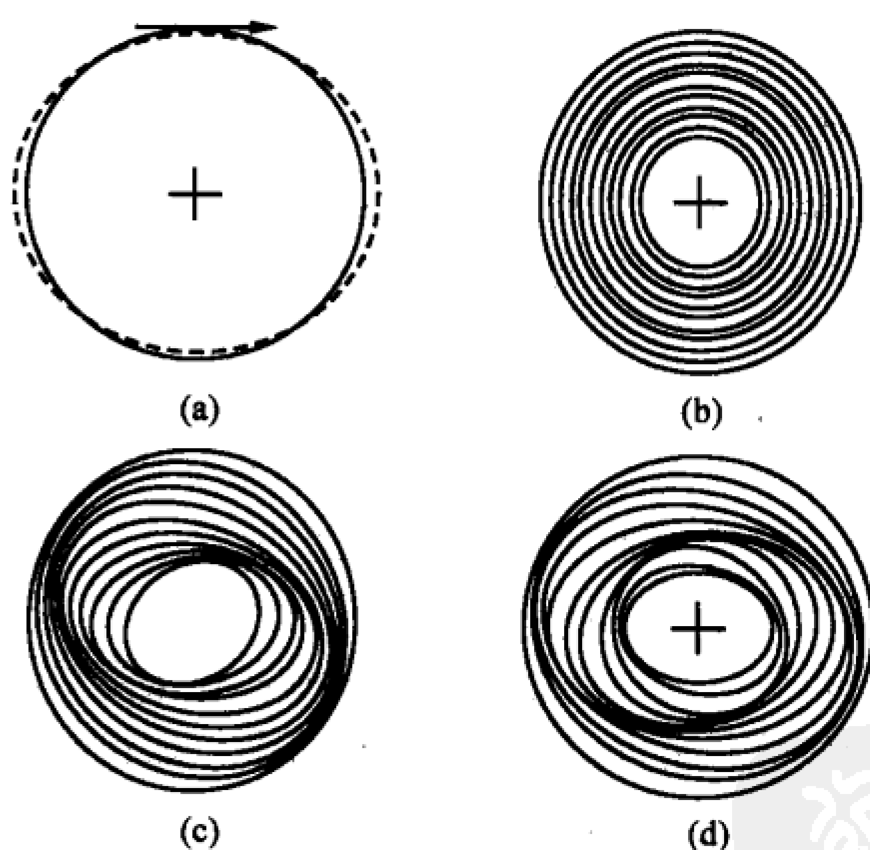


图 6.5.19　由密度波形成的旋涡结构

密度波理论认为，旋涡结构具有稳定性，因而能长久留存。所以，无论身处遥远距离的年龄很老的星系，还是比较年轻的星系，都有可能存在明显的旋涡结构。旋涡结构也可能有缓慢的转动趋势，但这种转动与恒星在星系中的公转运动是截然不同的。至于扰动产生的机制和扰动能量的来源，仍为悬而未决的问题。

银河系圆盘形的扁平结构是银河系中的天体快速转动的结果。庞大的银河

系，弄清楚它的自转情况谈何容易。天文学家通过多种探测方法，经过半个多世纪的研究，只能描述出一个大概（图 6.5.20）：在银河系中心区域是高速的类似刚体的转动，即处处以相同角速度旋转，线速度随离中心的距离而快速增加；至核球边缘处加到速度 250 千米/秒，再往外速度降低并略有起伏，到太阳处为 220 千米/秒。20 世纪 70 年代以来的观测表明，从太阳处往外，恒星绕银河系中心公转的线速度虽略有起伏但总的趋势为逐渐增加，到离银心 5.8 万光年处，达到 300 千米/秒，而且一路增加下去。恒星绕银河系中心公转的规律不大像太阳系里的行星那样，服从开普勒定律——角速度随着太阳的距离而大大减低，线速度也缓慢减少。对这种情况的解释是：在银河系边缘区域，或者在银晕中存在大量暗物质。

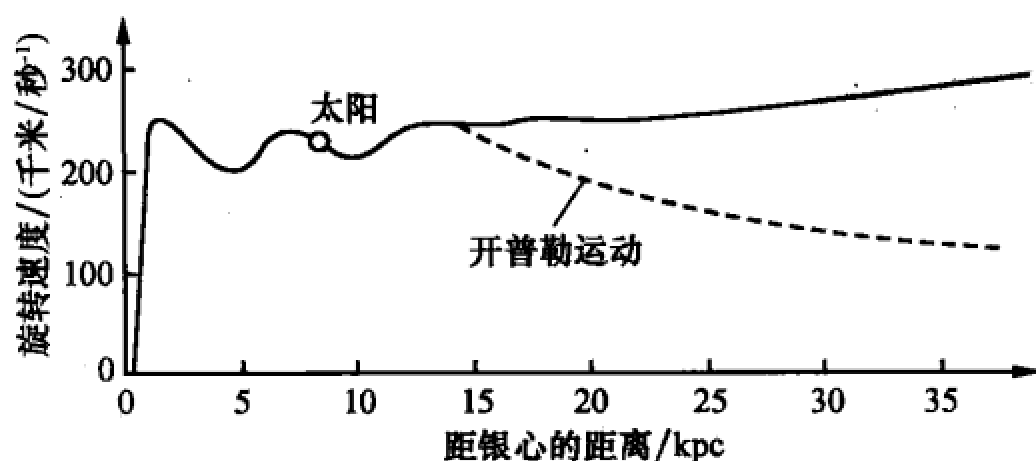


图 6.5.20 银河系自转的速度分布图

太阳带领其行星系统绕银河系中心转动的速度，1964 年国际天文学联合会确定的值是 250 千米/秒，1985 年修改为 220 千米/秒。方向是：从银道北面俯视，取顺时针方向；与太阳系天体绕太阳公转及太阳自转的方向相反。周期 2.7 亿年。在绕银河系中心运转的同时，太阳系还在银道面上下运动，周期为 6 200 万年。

除了恒星等天体的公转，银河系的旋臂图案也在银盘中转动。相对于旋臂图案，当由气体和尘埃物质组成的云团"冲进"旋臂时，因运动受阻而被压缩，使云团受到扰动而出现新恒星孕育的契机（详见 9.2 节）。在旋臂中诞生的恒星，如果是大质量的 O 型和 B 型星，由于寿命只有几千万年，等不到走出旋臂就消亡了，所以在旋臂以外几乎看不到它们的踪影。而像太阳这样的小质量恒星，寿命在 100 亿年以上，便有着进出旋臂的经历。我们或可推测：太阳已经多次穿越银河系的旋臂，差不多是 6 000 万年在旋臂内，8 000 万年在旋臂外。虽然，我们还不知道旋臂对于地球的环境曾产生什么影响，但有一些事实或许值得我们思考：恐龙灭绝的时代太阳系处于旋臂之外；而人类形成的年代，太阳系正在旋臂之中。我们现在还在猎户臂里，至少还将穿行2 000万年。

银河系中的恒星，除了绕银河系中心的公转运动之外，还有自己单独的运

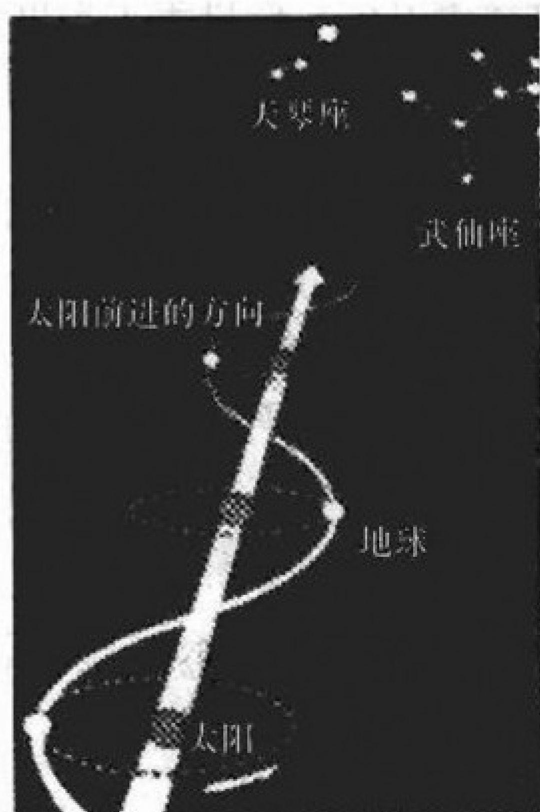


图 6.5.21　太阳带领我们向武仙座方向飞奔

动。太阳携带着他的太阳系家族就有向着所谓“奔赴点”（也叫向点）的运动，速度 19.7 千米/秒，方向即奔赴点位置在武仙座中（图 6.5.21）。

根据银河系自转的规律可以用力学方法推算银河系的总质量。20 世纪 60 年代，天文学家们还没发现外围天体线速度增加的情况。那时建立的银河系模型，银河系总质量为 $1.8\times10^{11}M_{\odot}$，其中恒星质量占 90%，星云和星际物质占 10%。到 20 世纪末，重新估计包括暗物质在内的银河系总质量，达到 $2\times10^{12}M_{\odot}$，亮物质与暗物质之比为 1∶9。增加 1 个数量级，质量增加了 10 倍。2004 年以来的天文观测，揭示出新的宇宙秘密：在整个宇宙中，亮物质与暗物质之比为 1∶5.1，而亮物质与暗物质加在一起，只占宇宙物质总量的 27%，其余 73%是神秘的暗能量（详见 12.8 节）。

6.6　星系团和超星系团

星系团和星系群是同级天体系统，只是成员数目大小不同。通常把成员数不超过 100 个的称为星系群，更多的称为星系团。星系团成员数差别很大，少的百来个，多的上万个，但尺度差别不大，一般为（1～5）百万秒差距。形状各不相同，有的结构致密，有的外形松散。至少有 85%的星系是各种星系群或星系团的成员。单从《帕洛玛星图》（参见 5.2.1 小节）上即可认证出几万个星系群和星系团。

本星系群之外一些著名的星系群有：巨蛇座塞弗特六重奏星系群，距离 1.9 亿光年（光盘图 6.6.1　“塞弗特六重奏”星系群）；摩羯座 HCG87 星系群，距离 4 亿光年（光盘图 6.6.2　摩羯座 HCG87 星系群）；长蛇座 HCG40 星系群，距离 3 亿光年（光盘图 6.6.3　长蛇座 HCG40 星系群）；飞马座与蝎虎座之交，斯蒂芬五重奏星系群 HCG92，距离 2.7 亿光年（光盘图 6.6.4　斯蒂芬五重奏星系群 HCG92），实际还有一个离得稍远的成员，应为六重奏星系群（光盘图 6.6.5　斯蒂芬五重奏星系群 HCG92 还有第六重）；狮子座 M66 星系群，距离 0.27 亿光年（光盘图 6.6.6　狮子座 M66 星系群）。

星系团按形态大致可分为规则星系团和不规则星系团两类。不规则星系团的典型代表是室女座星系团，这是离我们最近的一个星系团。它在天球上占据的天区范围为赤经 12^{h} 到 13^{h}，赤纬+20°到−20°，星系成员超过 2 500 个，其中椭圆星系占 19%，旋涡星系占 68%。《梅西叶星表》中所有 34 个河外天体中属室女

座星系团的就占 16 个。星系团中心面积 12°×10°，约有几百个成员，超巨椭圆星系 M87（NGC4486）位居中央，距离银河系 1 900 万秒差距（约 6 000 万光年），是全天最强的射电源和 X 射线源之一（光盘图 6.6.7 室女座星系团在天球上的位置；光盘图 6.6.8 室女座星系团的中心部；光盘图 6.6.9 室女座星系团中的马卡良星系链）。

规则星系团的典型代表是后发座星系团，位于后发座，角直径 4°，但也可能延伸至 7°的范围，呈球对称形。类似于银河系中的球状星团。后发座星系团中央星系非常密集，中心区约有 1 000 多个亮星系，包括 2 个超巨星系：椭圆星系 NGC4889 和旋涡星系 NGC4874，平均间距为 20 万秒差距。整个星系团成员可能有 1 万多个，退行速度 6 800 千米/秒，距离银河系 1.13 亿秒差距（约 3.7 亿光年）（光盘图 6.6.10 后发座星系团；光盘图 6.6.11 星座图上的室女座和后发座星系团）。

英仙座星系团也是一个成员较多的星系团（光盘图 6.6.12 英仙座星系团）。位居中央的是最亮的 NGC1275，也是强射电源和强 X 射线源，距离约 2.7 亿光年，也称英仙 A。光盘图 6.6.13 是 2008 年 8 月 20 日钱德拉望远镜释放的照片（光盘图 6.6.13 NGC1275 的 X 射线图像）。武仙座星系团，距离 3.6 亿光年，约有 100 个成员，结构比较松散，没有特别强大的中央星系（光盘图 6.6.14 武仙座星系团）。星系团 ACO3341，距离 5 亿光年（光盘图 6.6.15 ACO3341 星系团）。

2004 年美国宇航局发布的第一张空间望远镜照片是两个大星系团：长蛇座 RDCS1252.9-2927，距离 90 亿光年；室女座 TNJ1338-1942，距离 120 亿光年（光盘图 6.6.16 左：RDCS1252.9-2927 星系团；右：TNJ1338-1942 星系团）。RDCS1252.9-2927 可能是已知质量最大的星系团，拥有 200 万亿 $M_{\odot}$ 的质量。2007 年哈勃望远镜公布星系团 Abell S0740 的照片（光盘图 6.6.17 Abell S0740 星系团），该星系团位于半人马座，距离 4.63 亿光年，其中的巨椭圆星系 ESO325-G004 质量达 1000 亿 $M_{\odot}$。2009 年 4 月 16 日，哈勃和钱德拉望远镜公布星系团 MACS J0717.5＋3745 的照片（光盘图 6.6.18 MACS J0717.5＋3745 星系团），该星系团位于御夫座，距离 54 亿光年，可能是星系最密集的星系团。

图 6.6.19 是 1995 年哈勃望远镜拍摄的大熊座宇宙深空图（光盘图 6.6.19 大熊座宇宙深空图）。光盘图 6.6.19 是其一角，只有 1/30 月亮直径的范围，却有数千个星系（光盘图 6.6.20 大熊座宇宙深空图一角）。整幅图是在连续 10 天之内 342 次拍摄，然后拼接而成的。最暗天体 30 等。2003 年 9 月哈勃望远镜拍摄的南天天炉座宇宙深空图（光盘图 6.6.21 天炉座宇宙深空图），在 1/10 月亮直径范围内，有 1 万个星系。光盘图 6.6.21 是其一角（光盘图 6.6.22 天炉座宇宙深空图一角）。

1953年，法国天文学家沃库勒（G. de Vaucoulears）提出超星系团的概念，认为本星系群、室女座星系团、大熊座星系云以及50个左右较小的星系群、星系团和星系云共同构成一个巨大的扁平状天体系统，是比星系团更高一级的天体大家族，称为本超星系团（cluster of hypergalaxies），中心在室女座星系团附近，范围为（3～7.5）千万秒差距（光盘图6.6.23　本超星系团空间结构图）。本超星系团之外，当然还有别的超星系团。但研究认为，像本超星系团这样拥有几十个成员的为数不多。其他的超星系团通常只含有10个左右星系团，具有扁长的外形，长轴范围6 000万～1亿秒差距，长短轴之比约为4∶1。超星系团内部，星系团之间的引力作用比星系团内部星系之间的引力作用弱得多，说明到这个级次上，天体成团趋势已经明显减弱。

前面介绍过的后发座星系团和英仙座星系团，按其距离已超出本超星系团的范围，应当是其他的超星系团的成员。现在已知的超星系团还有武仙座超星系团、北冕座超星系团和巨蛇座超星系团等。至于是否所有的星系团都是不同大小的超星系团的成员，由于观测资料的不充分和方法上的困难，还不能明确回答。

比超星系团更高一级的天体系统称为总星系（metagalaxy）。还有没有本总星系和别的总星系呢？没有了，或者说到现在还没有发现。超星系团之间似乎已不再有成团趋势，而趋于均匀分布。这种大尺度的均匀性，表现出物质和运动分布在统计上的各向同性，不存在任何特殊的位置和方向。总星系是目前人类已知的最高级的天体系统，包括所有观测到的宇宙的全部。现代天文学观测所及的距离约137亿光年，还没有超出总星系的范围。

20世纪70年代以来，随着观测技术和观测设备的日益提高，对星系的观测向纵深发展。从星系的红移量数据获得大量的星系距离的资料，使星系在宇宙空间的三维分布图像更加清晰。人们对星系分布的不均匀程度有了更确切的了解。星系不仅成团，组成星系团和超星系团，而且还存在一些星系特别少的区域，被称为空洞或巨洞。如在牧夫座方向，已发现一个尺度达6 000万秒差距的大空洞，由一些星系密度较高的壁状区域围绕着。空洞内的星系密度只有平均密度的1/5甚至更低。与空洞相反，还存在一些比超星系团更大的结构。如在离我们1亿秒差距的地方，存在着一个横跨很大赤经范围的巨大的星系密集的片状区域，长约1.7亿秒差距，宽约6 000万秒差距，厚约500万秒差距，称为宇宙“长城”（光盘图6.6.24　宇宙“长城”示意图）。其中的星系密度比平均密度大五倍左右，总质量有银河系质量的几十万倍，是迄今所知的最大的天体结构。

对星系的视向速度分布也作了一些比较系统的观测研究，发现在扣除了所有星系随宇宙一起膨胀的共同运动之外，还存在着星系自身的本动速度。在几千万秒差距范围内，似乎所有星系在受着一个“巨吸引子”的控制而大尺度流动。这个巨吸引子的中心位于长蛇座与半人马座之间的方向，距离约为4 300万秒差

距，总质量达 $5\times10^{16}M_{\odot}$，相当于 50 万个银河系的质量。这个巨吸引子究竟是什么？它是怎样形成的？人们不得而知。在宇宙大尺度上的均匀或非均匀结构方面，疑团甚多，是当今宇宙学研究中重大但悬而未决的问题。

6.7 活动星系

活动星系也叫特殊星系。20 世纪 50 年代以前，天文学家们认识到宇宙中有无数的星系，彼此相隔着十分遥远的距离，给人以宁静、庄严的感觉。当射电天文学、红外和 X 射线天文学发展起来，人们才发现情况远非如此。星系普遍存在着活动现象，有的规模大，有的规模小。绝大多数星系只有低水平的活动，归为正常星系；约占 2%的星系活动激烈，称为活动星系或特殊星系。

正常星系是大量恒星在引力约束下形成的天体集团，其辐射大部分由恒星发出，主要是在光学波段，物理过程处于热平衡状态。活动星系的高强辐射遍布从射电到 γ 射线的全部波段，一般说来它们具有非热辐射的性质，处于远非热平衡和引力平衡的状态。活动星系含有大量非恒星物质，在特殊的物理条件下，大规模的涌动、爆发、吸积、喷流，或与同伴星系之间发生激烈的扰动。

活动星系常分为以下几种类型，有的以发现者或所在的星座命名。

6.7.1 射电星系

最早被发现的是天鹅座 A，也叫 3C405。1948 年观测到其射电强度为 2.3×10^{38} 瓦，超过银河系各种辐射总和的 20 多倍。奇怪的是其射电辐射区域分成两处，各呈圆斑状，相距甚远，称之为射电双瓣。在这两个瓣之间的位置上用光学望远镜长时间曝光拍照，一无所获。直到 1954 年才在双瓣的中央位置找到一个视亮度为 16 等，像是两个正在相互融合的旋涡星系（光盘图 6.7.1 天鹅 A 射电双瓣中间的旋涡星系）。光谱测定其红移量为 0.057，相应的距离为 2.3 亿秒差距（约 7.6 亿光年，取哈勃常数 $H_0=71$），双瓣分开的距离为 45 万光年。40 年后，钱德拉 X 射线望远镜拍摄到天鹅 A 中央天体的细节，判断其中有巨型黑洞（光盘图 6.7.2 天鹅 A 中央天体）。

射电星系半人马座 A，距离 1 100 万光年，也是双瓣结构，双瓣分开 100 万光年，中央星系是 NGC5128（光盘图 6.7.3 半人马 A 射电双瓣和星系 NGC5128；光盘图 6.7.4 半人马 A 的光学、X 和射电综合图像）。

射电星系波江座 0313-192，距离 9 亿光年，双瓣分开 150 万光年，光学和射电望远镜阵的合成图像清晰而壮观（光盘图 6.7.5 波江座 0313-192 的光学和射电综合图像）图 6.5.9 是中央星系的红色喷流（光盘图 6.7.6 波江座 0313-192 的喷流）。

20 世纪 70 年代末，天文学家用综合孔径射电望远镜探测到最大的射电双瓣

结构是位于小狮座的 3C236（光盘图 6.7.7 小狮座 3C236 的射电图像），双瓣延伸到范围达 1 300 万光年（光盘图 6.7.8 小狮座 3C236 的射电图像线图），是宇宙间迄今已知最大的单个天体，距离我们 12 亿光年。哈勃望远镜拍到其中央位置的椭圆星系，尺度 1.6 万光年，只有射电尺度的 1/800（光盘图 6.7.9 小狮座 3C236 中央的椭圆星系；光盘图 6.7.10 小狮座 3C236 中央的椭圆星系线图）。

在所有已观测到的河外射电源中，有双瓣结构的射电系约占 40%，说明这种结构是相当普遍的现象。天文学家认为射电瓣的辐射能量来自中央的星系，辐射性质不是热辐射而是同步加速辐射。这种辐射是电子在强磁场中沿圆轨道或螺旋形轨道近光速运动时产生的，其功率和方向性都特别强。

一种理论认为，能量的传送是从星系中心向两侧发出的高速喷流完成的。喷流中的物质在星际介质的阻滞作用下，流速渐减，物质和能量便在终点处堆积起来，转化为强大的射电辐射，形成双瓣结构。美国射电望远镜阵（VLA）已经清楚地观测到天鹅座 A 双瓣之间细长条状的物质喷流迹象（光盘图 6.7.11 天鹅 A 射电双瓣之间的喷流）。光盘图 6.7.12 是半人马 A 的喷流示意图（光盘图 6.7.12 半人马 A 的喷流示意图）。钱德拉望远镜 2008 年 1 月 9 日释放的新图中，半人马 A 的喷流延伸达 100 万光年（光盘图 6.7.13 半人马 A 喷流的 X 射线图像）。

甚长基线干涉仪（VLBI）的观测还显示出喷流在没有射电瓣结构的致密射电星系中也是普遍存在的。也许所有射电星系都有同一的结构：一个核，一对喷流和一对瓣。只是由于喷流的走向与视线之间角度不同，有的射电星系显不出双瓣结构而已。光盘图 6.7.14 是射电星系喷流示意图（光盘图 6.7.14 射电星系喷流示意图）。光盘图 6.7.15 是室女座射电星系 NGC4261，左图是地面望远镜拍摄的光学像，右图是哈勃望远镜拍摄的中央星系，距离 4 500 万光年（光盘图 6.7.15 室女座射电星系 NGC4261）。

以下 5 张照片都是美国国家射电天文台拍到的射电星系。3C31 在双鱼座，距离 2.5 亿光年，中央是旋涡星系 NGC383，喷流长 9.2 万光年（光盘图 6.7.16 双鱼座 3C31 射电星系）；3C296 在牧夫座，距离 3.6 亿光年，中央是椭圆星系 NGC5532，喷流长 2.5 万光年（光盘图 6.7.17 牧夫座 3C296 射电星系）；3C433 在狐狸座，距离 14.5 亿光年，中央可能是一对双星系（光盘图 6.7.18 狐狸座 3C433 射电星系）；3C288 位于猎犬座，距离 30 亿光年，喷流长 34 万光年（光盘图 6.7.19 猎犬座 3C288 射电星系）；3C272.1 即 M84 星系，位于室女座星系团中心，距离 5 500 万光年，喷流长 4.5 万光年（光盘图 6.7.20 室女座 3C272.1 射电星系）。

6.7.2 爆发星系

有爆发活动的星系称为爆发星系。大熊座里的不规则星系 M82，距离 1 200

万光年，光盘图 6.2.41 已经展示了它的光学波段照片。哈勃空间望远镜的红外观测，发现其核心曾发生猛烈地爆发，以 1 000 千米/秒的速度向外抛射物质，能量输出功率超过银河系辐射总功率的 20 倍。光盘图 6.7.21 是基特峰美国国家光学天文台和哈勃空间望远镜合成的 M82 爆发星系照片（光盘图 6.7.21 大熊座 M82 爆发星系），光盘图 6.7.22 是 2006 年 4 月释放的斯必泽望远镜照片（光盘图 6.7.22 大熊座 M82 爆发星系的红外照片）。

另一个曾被认为属于爆发星系的例子是室女座中的巨椭圆星系 M87，也叫室女座 A 射电源，距离 5 700 万光年，是室女座星系团的中心星系。室女座星系团是本超星系团的中央星系团。哈勃空间望远镜拍摄到 M87 中心发出的炽热气体的喷流，长度约 5 000 光年（光盘图 6.7.23 室女座星系 M87 的喷流），美国国家射电天文台拍摄到喷流中心点的精细图像和更大范围的喷流（光盘图 6.7.24 M87 的喷流的射电图像）。精密的分光和光度测量，得到了整个星系从中央到边缘的亮度变化曲线（图 6.7.25 M87 的亮度分布）。从中可以看出，M87 中心区亮度比一般星系有较大的提升。一种解释是，在 M87 中心有一个质量约 30 亿 $M_{\odot}$ 的巨型黑洞，它把更多的恒星吸引到核心周围，使核心区的亮度大为增加。也有人把 M87 分类为致密型的射电星系，其中心约 1/4 光年的区域发出强烈的射电辐射。1994 年哈勃空间望远镜观测到它的核心区的辐射，一侧有红移，另一侧有紫移，说明那里有极高速的旋转运动（光盘图 6.7.26 M87 有极高速的旋转运动）。光盘图 6.7.27 是斯必泽望远镜 2008 年 8 月 5 日释放的 M87 喷流红外新照（光盘图 6.7.27 M87 喷流红外新照）。

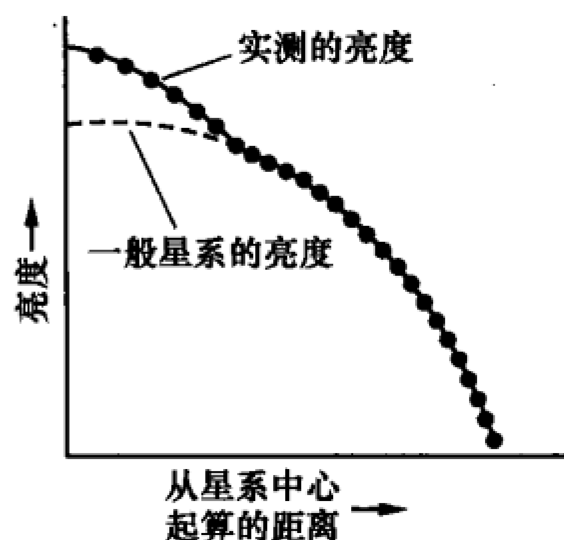


图 6.7.25 M87 的亮度分布

1983 年上天的红外天文卫星 IRAS 已发现数千个类似 M82 的星系，大多有旋涡结构，红外辐射的强度高于光学波段数十倍。其中有一类，爆发区的尺度约数千光年，正在经历着非常迅速的恒星形成过程，被称为“星爆星系”，意指有大量恒星爆发式的产生。距离 5 000 万光年的大熊座 NGC3079 就是一个典型，在其核心区 3 000 光年范围内正在喷发大量的热气体，高度达 3 500 光年（光盘图 6.7.28 大熊座星爆星系 NGC3079），有大量恒星正在产生。大熊座另一个星爆星系是 NGC3310，距离 5 900 万光年（光盘图 6.7.29 大熊座星爆星系 NGC3310），估计其核心区在 10 万年内产生了 100 万颗恒星。玉夫座星爆星系 NGC253，距离 880 万光年（光盘图 6.7.30 玉夫座星爆星系 NGC253），钱德拉望远镜拍摄的恒星产生区直径 3 000 光年（光盘图 6.7.31 NGC253 中心区 X 图像）。

6.7.3　塞佛特星系

塞佛特星系是一类具有亮核的旋涡星系，活动性比 M82 和 M87 更强。1943 年为美国天文学家塞佛特（C. K. Seyfert）首次发现。在全部最亮星系中，塞佛特星系占 10%。它们同时发出很强的射电、红外、紫外和 X 射线辐射，功率都在 10^{38} 瓦以上；可见光波段光度并不特别高，与普通星系相当，低于一些射电星系。塞佛特星系的光度主要集中在核区，并发生快速变化，变幅达 2～3 倍，周期几天至几年。如果对塞佛特星系短时间曝光拍照，只能拍下亮核，长时间曝光才能显出周围的结构和旋臂外形。亮核的尺度一般不超过 10 光年，其中有不足 1 光年的异常活动区，区内的辐射功率超过银河系 100 倍。

早期发现的塞佛特星系有位于猎犬座的 NGC4151，距离 4 000 万光年（光盘图 6.7.32　猎犬座塞佛特星系 NGC4151）。它的核特别明亮，每年约有 $100M_\odot$ 质量的物质从核中被抛射出来。从光变时间判断，核区的尺度为 1/6 光年，而整个星系比之大数千倍。飞马座塞佛特星系 NGC7742，距离 7 200 万光年，中央核区的明亮程度特别明显（光盘图 6.7.33　飞马座塞佛特星系 NGC7742）。

塞佛特星系的光谱中含有在正常星系光谱中通常看不到的发射线。这些发射线都比较宽。有些塞佛特星系核中还发出很强的红外辐射，表明星系中有大量很热、很亮的年轻恒星及非恒星物质，包括尘埃和气体。圆规座塞佛特星系直径 1 300光年，距离 1 300 万光年。绿色的内环像星爆星系那样有大量热气体喷出（光盘图 6.7.34　圆规座塞佛特星系）。位于仙女与双鱼座之间的塞佛特星系 NGC262，距离 3 亿光年，直径 95 万光年，比银河系大 10 倍（光盘图 6.7.35　塞佛特星系 NGC262 的射电图像）。在大熊和猎犬座之间的 M106，从光学照片上看只是一个普通的旋涡星系（光盘图 6.7.36　塞佛特星系 M106 的光学图像），但射电图像显示明亮的核区和喷流，直径 3 000 光年，距离 2 500 万光年（光盘图 6.7.37　塞佛特星系 M106 的射电图像）。大熊座 3C219，距离 3 亿光年，具有射电星系的双瓣特征，但中央核区另有一道物质喷流，归类为塞佛特星系（光盘图 6.7.38　塞佛特星系 3C219）。另有一类与塞佛特星系类似的星系，中央有亮核，但外围看不出旋涡结构，有较强的射电辐射，称为 N 型星系。

6.7.4　蝎虎座 BL 型天体

蝎虎座 BL 型天体（BL Lac 天体）是一类具有非常亮的星系核的椭圆星系，它的典型代表是蝎虎座 BL。1929 年首次观测到这个天体时，以为是一颗银河系中的不规则变星，其亮度有时一周增强两倍，有时在几个月内增强 15 倍，没有什么规律性，最亮时视星等 13 等。其光谱是连续谱，没有任何谱线，因而无法得知它的距离。1968 年发现它有很强的射电辐射，后来又发现它还有很强的红

外辐射和 X 射线辐射。在大望远镜拍摄的光学像周围，可以看到一些绒毛状的东西（光盘图 6.7.39 基特峰光学望远镜拍摄的 BL Lac）。天文学家奥克（J. B. Oke）和冈恩（J. E. Gunn）于 1974 年用遮挡主体的办法拍到了“绒毛”的光谱线，测定其红移量为 $z=0.07$。1977 年美国里克天文台用类似的办法证实了这一结果。显然，它不是银河系中的变星，而是 10 亿光年远的河外天体。由距离和视星等算出其绝对星等为 $-22^{m}.9$，比银河系和一般其他星系都亮得多；由光变速度估计中心核的尺度只有几个“光日”或“光时”，比塞佛特星系的核要小得多，而外围是一个巨大的椭圆星系。蝎虎座 BL 天体只是巨大的椭圆星系中非常明亮的核。

至 1958 年，这类天体还只是一个孤证，但至 1979 年，已发现类似天体 59 个，被称为 BL Lac 天体，对它们的研究成为热门课题，至 1998 年共发现 350 个。光盘图 6.7.40 是 2006 年释放的 BL Lac 天体 H0323+02 的光学图像（光盘图 6.7.40 BL Lac 天体 H0323+02 的光学图像）。光盘图 6.7.41 是 BL Lac 天体 Mar421 多波段图像和辐射强度分布图（光盘图 6.7.41 BL Lac 天体 Mar421 多波段图像和辐射强度分布图）。光盘图 6.7.42 是帕洛玛天图上的 Mar421（光盘图 6.7.42 帕洛玛天图上的 Mar421）。BL Lac 天体是一类比塞佛特星系有更明亮星系核的遥远星系，活动十分激烈，几周或几十分钟内就有巨大的变化。最亮时比正常星系亮一万倍，而核的尺度非常小，其辐射肯定不是热辐射，在其内部很可能隐藏着巨大的黑洞。光盘图 6.7.43 是 BL Lac 天体的结构示意图（光盘图 6.7.43 BL Lac 天体的结构示意图）。对 BL Lac 天体的辐射机制、能量转换等问题的研究，是当代天体物理学的重要课题。

6.7.5 互扰星系

在星系团中，相互靠近的星系受引力作用可能会发生碰撞。碰撞的过程很长，最终可能会合并成一个星系，与原来的星系相比，结构上发生很大的变化。在富星系团中心附近，常存在一两个超巨椭圆星系，估计就是经这类碰撞后合并形成的。

在一个正常星系里，恒星之间相互碰撞的可能性几乎没有，而在富星系团中心区域，星系的间距相对较小，密近相遇或发生碰撞是可能的。从帕洛玛星图中可以找到一些相互靠得很近的星系，其间出现相互连接的“桥”或“尾”，经高速计算机模拟它们的结构和运动状态，说明正在相互密近或碰撞。这类星系称为互扰星系。

猎犬座旋涡星系 M51，紧挨着另一个小星系 NGC5195（光盘图 6.7.44 M51 与 NGC5195 之间的物质联系）。无论是左图哈勃望远镜的光学图像还是右图斯必择望远镜的红外图像都表现出二者的亲密关系。如果说这也许是偶然重叠在一起的影像，不代表真实的物质联系，那么更多的照片显示星系之间接触、碰撞、融合，就很难说都是偶然的了。距离 1.4 亿光年的大犬座旋涡星系对

NGC2207 与 IC2163 的紧密接触（光盘图 6.7.45　NGC2207 与 IC2163 之间的紧密接触；光盘图 6.7.46　NGC2207 与 IC2163 的红外图像）；距离 6 200 万光年的乌鸦座 NGC4038 和 NGC4039 两个星系水乳交融（光盘图 6.7.47　NGC4038 与 NGC4039 水乳交融）；距离 3 亿光年的天龙座 NGC6621 和 NGC6622 两个星系如胶似漆（光盘图 6.7.48　NGC6621 与 NGC6622 如胶似漆）都是这类星系的典型例子。距离 2 亿光年的天琴座“一只鸟头”NGC6745（光盘图 6.7.49　NGC6745 像一只鸟头）；距离 3 亿光年的后发座“一对耗子”NGC4676（光盘图 6.7.50　NGC4676 像一对耗子）；距离 3 亿光年的后发座“两只水母”Arp87（光盘图 6.7.51　Arp87 像两只水母）均表现出星系之间的扰动和融合。在金牛座 NGC1409 与 NGC1410 之间，有一条清楚的暗带互相连接（光盘图 6.7.52　NGC1409 与 NGC1410 之间的暗带）；在孔雀座 NGC6872 与 IC4970 之间，正准备亲密接触（光盘图 6.7.53　孔雀座 NGC6872 与 IC4970）；它们的距离也都是 3 亿光年。

长蛇座 NGC3314，距离 1.2 亿光年（光盘图 6.7.54　极环星系 NGC3314），半人马座 NGC4650，距离 1.3 亿光年（光盘图 6.7.55　极环星系 NGC4650），与星系盘面垂直的另一个小星系与之融合，形成极环，被称为极环星系。这类星系已发现 100 个左右。哈勃望远镜 2008 年 9 月 16 日刚释放的玉夫座互扰星系，距离 7.8 亿光年（光盘图 6.7.56　玉夫座互扰星系）是正在形成极环的例子。

被称为“黑眼睛星系”的 M64，位于后发座，距离 1 700 万光年，是两个大星系碰撞、融合形成的（光盘图 6.7.57　黑眼睛星系 M64）。长蛇座 ESO510-G13，距离 1.5 亿光年，其扭曲的中央尘埃带，在碰撞形成之后还没有融合好（光盘图 6.7.58　长蛇座 ESO510-G13 星系）；而大熊座 UGC06471 与 06472 之间正在融合（光盘图 6.7.59　大熊座 UGC06471 与 06472 星系）；英仙座 NGC7331，距离 4 900 万光年，融合已经完成（光盘图 6.7.60　英仙座 NGC7331 星系）。天炉座 A 是具有双瓣的射电星系，距离 9 000 万光年，其中央星系不是一个而是两个椭圆星系 NGC1316 和 NGC1317，可能是 30 亿年前由更多的星系融合而成（光盘图 6.7.61　天炉座 A 射电星系）。玉夫座车轮星系，距离 5 亿光年，中央是星系核，外围一圈亮环，分布着许多年轻的恒星，其间有辐条状的结构，估计是 2 亿年前，遭一个小星系正面撞击后形成的（光盘图 6.7.62　玉夫座车轮星系）。

2008 年 4 月 24 日哈勃望远镜网站公布了 59 幅互扰星系的精彩照片，本书选择 4 幅供读者欣赏：大熊座 Arp 148，距离 4.5 亿光年（光盘图 6.7.63　大熊座 Arp 148 星系）；武仙座 NGC6050/IC1179，距离 1.5 亿光年（光盘图 6.7.64　武仙座 NGC6050/IC1179 星系）；剑鱼座 AM 0500-620，距离 3.5 亿光年（光盘图 6.7.65　剑鱼座 AM 0500-620 星系）；大熊座 Arp 238，距离 4 亿光年（光盘图 6.7.66　大熊座 Arp 238 星系）。

第7章　当代天文学新视野

天文学，由其目标的崇高与理论的完善，是人类精神的最美好的成就，也是人类智能的卓越作品……人类虽然在极渺小的地球上测量天体，而人类自身是何等伟大！

——拉普拉斯，《宇宙体系论》

也许最大的奇迹是一种好奇的小灵长类动物，脱离野蛮时代才几千年，竟会向他周围广大的空间深渊窥测，并且远溯往古，试图了解宇宙的结构和演化。

——克里福特·西麦

7.1　从光学望远镜到全波段天文学

7.1.1　望远镜的功能

望远镜是现代天文学探索宇宙的主要工具。光学望远镜的功能有二：一是尽可能多地收集来自天体的光子；二是将收集到的光子聚焦成尽可能清晰的像。前者取决于镜面的尺寸和透光或反光效率；后者取决于镜面及整个光学系统的加工与装配质量，同时与镜面尺寸也有密切的关系。除此以外，还要求支架系统既精密稳固，又方便灵活，能随意指向天空的各处，并能长时间的跟踪天体。人的肉眼在精巧程度和使用的灵活性方面是无与伦比的，唯一的不足之处是尺寸太小，收集到的光量太少，同时也影响清晰度。因此人的肉眼看不见暗于6.5等的恒星，看不清土星有光环、金星有盈亏，也看不清月面上的影像和银河的细节，更看不见遥远的河外星系。

从物理上说，“看得见”和“看得清”是两方面的问题。前者是指接受到光子的数量有多少；后者是指光子在视网膜上集合成像的清晰度。正常人眼“看得见”的最低标准是每秒钟有约140个光子进入瞳孔。低于此标准，就不能引起视觉生理响应。人眼最敏感的是波长550纳米的黄绿色可见光。按此波长计算，140个光子所携带的能量为5×10^{-17}瓦。人眼之所以不能看见比6.5等更暗的星，就是因为星光送入眼帘的光子数量低于最低标准。接受光子数的多少与接受器面积大小成正比。人眼瞳孔的直径一般为6毫米左右，面积比望远镜小多了。望远镜口径越大，能接受到的光子数越多，“看得见”的本领就越高。此外，人

眼对接受光子产生的视觉响应在视网膜上保存的时间只有 1/24 秒，时间一过，就被新的画面所取代，光子不能连续累积。而望远镜却可以透过机械装置跟踪天体，使光子长时间累积在接收器上，“看得见”的功能便大为增强。例如，我国的大光学望远镜之一，位于河北省兴隆县燕山深处中国科学院国家天文台兴隆观测站，口径 2.16 米，通光面积比人眼大 13 万倍，再加上可长时间跟踪观测，“看得见”的能力比人眼强 250 万倍。人眼视觉能力的极限是 12.5 千米外的一支烛光，而 2.16 米望远镜的能力是把这个距离推远到 2 万千米。一台望远镜能“看得见”的最暗的星等数称为极限星等。2.16 米望远镜的极限星等是 22.5 等。至于“看得清”的问题，当然和光学系统的质量，比如玻璃的品质、加工精度、装配精度、保养状况等有关。但即使是完全理想的光学系统，仍然有一个逾越不了的限制，那就是由光的物理本性所决定的衍射效应。

光有二象性，既是光子流也是电磁波。一切波动都会产生衍射现象。由于光波衍射，从一个点发出的光子被最理想的光学系统聚焦后，仍不能集中在一个点上，而是散布在一个小圆面和小圆外围一圈一圈逐渐减弱的亮环中。中央的小圆面称为爱里斑（Airy disk）。如果两个物点的距离太近，使各自的两个爱里斑相连，就不能清楚地分辨出两个物点的像。也就是说，光的衍射现象限制了“看得清”的能力。光学名词中，把光学系统能分清为两个物点的最小的角距离称为分辨角，也叫分辨率。分辨率与光的波长和光学系统口径有关，计算公式为

$$\theta = 1.22\frac{\lambda}{D}\quad（弧度）$$

式中，θ 是分辨率，λ 是波长，D 是光学系统口径。在可见光范围，取 $\lambda=550$ 纳米，D 以厘米为单位，θ 以角秒为单位，计算公式为

$$\theta = \frac{14}{D}\quad（角秒）$$

例如，人眼的分辨率为 $14/0.6=23''$，而 2.16 米望远镜的分辨率为 $14/216=0''.06$。按此数据计算，人眼能分清相距 10 厘米细节的距离为 0.9 千米，而 2.16 米望远镜的能力是把这个距离拉远到 300 多千米。但这只是仅考虑衍射极限的理想情况。实际的分辨率除受衍射限制以外，还受光学系统质量及大气透明度、稳定度的影响。天文学上把大气原因造成的分辨率干扰称为视影。评定某地大气光学质量的参数称为视宁度（seeing）。即使在视宁度很高的天文台优选地址，视影圆斑也会达到 $1''$左右。在现代都市里，天空光污染严重，不仅分辨率极差，连“看得见”的能力也大打折扣。没有离开过大城市的人，从来没有见过繁星满天的壮观景象，更没有欣赏过皎皎银河的风姿。缺乏感性认识，必然会削弱对大自然的钟情与求索精神。表 7.1.1 列出一些以极好大气条件为前提的计算数据。

表 7.1.1 望远镜功能数据

望远镜口径	极限星等数	看见一支烛光的距离/千米	分辨角	分清 10 厘米细节的距离/千米
人眼（6 毫米）	6.5	12	23″	0.9
2.16（米）	22.5	2 万	0″.5	40
5（米）	26	10 万	0″.2	100
10（米）	28	25 万	0″.2	100

根据极限星等 m，推导“看见一支烛光”的距离 r 的计算公式如下：

已知 $E=E_0 10^{-0.4m}$，$E_0=2.54\times10^{-6}$ 勒克斯，E 是恒星产生的照度。但照度与距离的平方成反比：$E\propto\frac{1}{r^2}$，即 $r\propto\frac{1}{\sqrt{E}}$，在考虑单位适当换算的情况下，可写为

$$r=\frac{1}{\sqrt{E}}=\frac{1}{\sqrt{E_0 10^{-0.4m}}}=E_0^{-\frac{1}{2}}10^{0.2m}$$

E_0 的单位为勒克斯，相应的长度单位为米，若取千米为单位，则 $r=0.627\,5\times10^{0.2m}$ 千米，m 为极限星等数。对于人眼，$m=6.5$，则 $r=0.627\,5\times10^{1.3}$ 千米 $=12.5$ 千米。

根据分辨角 θ 推导“分清 10 厘米细节”的距离 R 的计算公式如下：

$$\frac{10}{R}=\tan\theta=\frac{\theta}{206\,265}$$

式中，θ 的单位是角秒。若取千米为单位，则

$$R=\frac{20.626\,5}{\theta}\text{ 千米}$$

例如，人眼的鉴别角为 23″，则 $R=20.626\,5/23$ 千米 $=0.9$ 千米。

7.1.2 天文光学望远镜的类型

1. 折射望远镜

折射望远镜的物镜是玻璃透镜。由天体来的平行光经透镜折射后在焦平面上聚焦成像（图 7.1.1）。早期的折射望远镜物镜为单块透镜。由于玻璃对不同波长的光有不同的折射率，所以来自天体的不同颜色的光经透镜折射后不能聚焦在一处，因而产生五颜六色的像差，称为色差，严重影响望远镜的光学质量。19 世纪晚期，人们找到一种办法，用两块材质不同的玻璃，一凸一凹组成复合透镜，可以很好地消除色差。但这样一来，玻璃加工面由 2 面变成了 4 面，而且还要求极高的装配精度；加之光线要进入玻璃内部再折射出来，对玻璃内部的气泡、杂质等缺陷限制极严，使折射望远镜不能口径太大。玻璃对近红外光吸收比较严重，使天体辐射来的信息量损失较大。现代大型天文望远镜都不采用折射型，但在业余级的小型



图 7.1.1 折射望远镜光学系统

望远镜中，折射望远镜仍然受欢迎。主要原因是视线方向与天体所在方向一致，找星容易，使用比较方便；视场较宽，适合观测月亮、彗星等延伸天体；同时镜筒长，有比较雄伟的外貌，给人壮观的感觉。

2. 反射望远镜

反射望远镜的物镜是反射镜，最早期用金属制造，后改进为用玻璃磨制成旋转二次曲面（球面、椭球面、旋转抛物面或旋转双曲面），表面镀金属反光膜。原先镀银，现代都镀铝。反射镜没有色差也没有光线被玻璃吸收的问题，但轴外光线像差较大，造成视场中央部分成像清楚，周围成像模糊，因而视场受到限制，一般都把视场设计得很小。最简单的反射望远镜的物镜只有一个光学加工面，而且对玻璃内部的品质要求降低，所以造价和技术难度都低于相同口径的折射望远镜。现代大型天文望远镜都采用这种类型。反射望远镜依副镜和光路不同又分为多种形式，常用的有牛顿式、卡塞格林式和格里高利式，见图 7.1.2。牛顿式的副镜是平面镜，卡塞格林式的副镜是凸双曲面镜，格里高利式的副镜是凹椭球面镜。后两种整个光学系统的焦距都比主镜的焦距延长，但需在主镜中央开挖通光孔。业余级的小型望远镜多采用牛顿式，专业的大型望远镜多采用后两种形式。

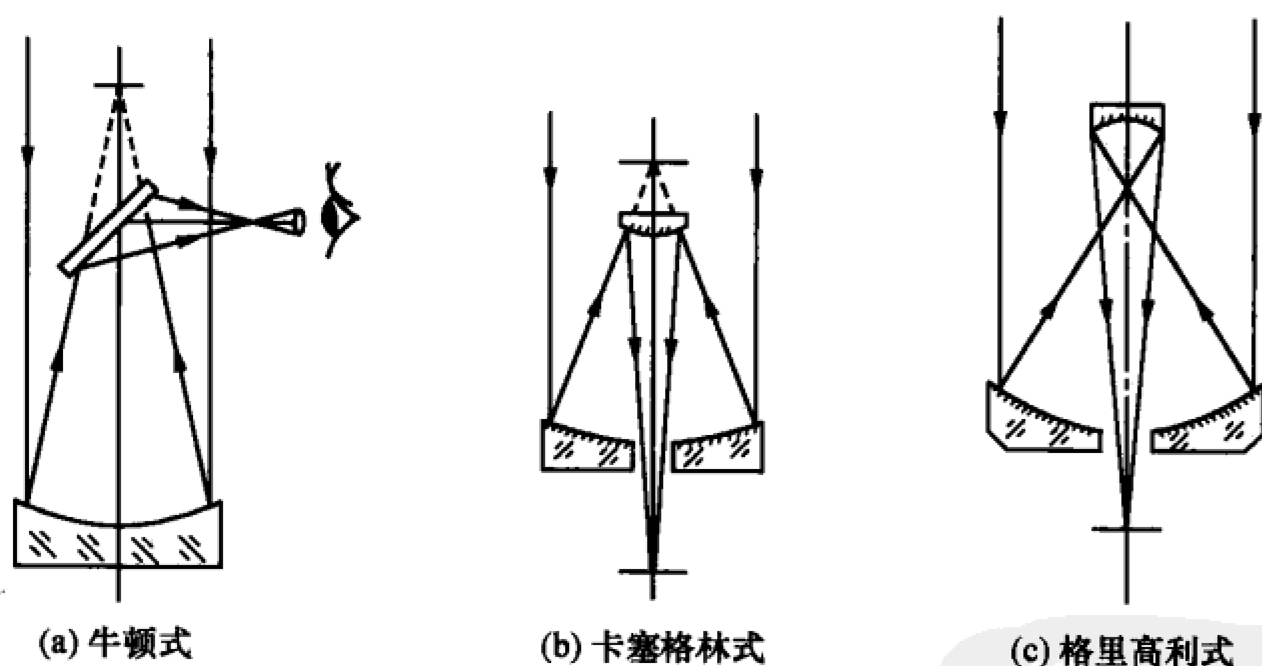


图 7.1.2 反射望远镜光学系统

3. 折反射望远镜

1931 年德国光学家施密特（B. V. Schmidt）发明折反射望远镜，又称施密特望远镜（图 7.1.3）。其主镜是球面反射镜。球面镜没有轴外像差，视场可以很大，同时加工也比抛物面镜容易。但球面镜仍有球差，并且像散严重，使轴内、轴外的成像都不清楚。为了克服球差和像散，在镜筒入口处球面镜球心位置

加一片折光的改正透镜，再把焦平面考虑成球面，便可获得成像质量好、视场又很宽大的效果，特别适用于观测面积较大的延伸天体和作巡天观测（对较大天空范围作普查式的天文观测称为巡天）。

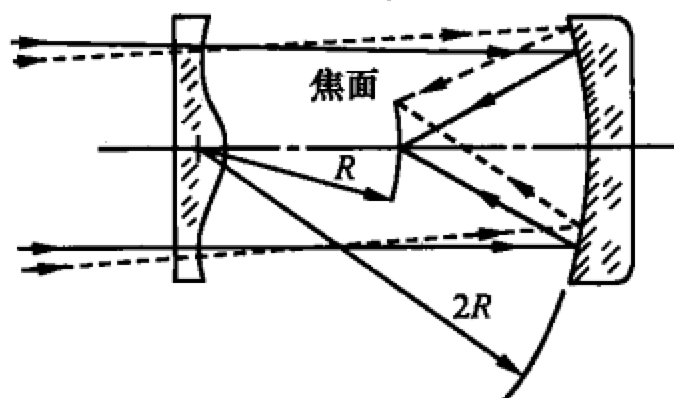


图 7.1.3 折反射望远镜光学系统

折反射望远镜的改正透镜表面不是圆锥曲面，而是旋转四次曲面，加工难度很大，同时也存在大尺寸透镜材料的限制，所以口径不能太大。目前世界上最大的是德国陶登堡史瓦西天文台的施密特望远镜，主镜口径 2.03 米，改正镜口径 1.34 米。

1940 年，苏联光学家马克苏托夫（Д. Д. Максутов）发明了另一种折反射望远镜，改正透镜为弯月形，称为马克苏托夫望远镜，多用于中小型望远镜。

7.1.3 天文光学望远镜的制造简史

光学望远镜是荷兰眼镜工人在无意中发明的。1608 年眼镜商里帕席（H. Lipperhey）为荷兰海军提供了第一架望远镜（光盘图 7.1.4 里帕席画像）。1609 年年末，伽利略亲手制作了一台望远镜用于观测星空，那是人类第一台天文望远镜，口径 4.4 厘米，焦距 1.2 米，折射式。光盘图 7.1.5 是伽利略亲手制作的天文望远镜，左为镜筒，现存意大利佛罗伦萨物理博物馆，右为珍藏着的现已破碎的镜片（光盘图 7.1.5 伽利略亲手制作的天文望远镜）。凭着这架望远镜，伽利略发现了月亮上有环形山和“海”（大块平坦的陆地），木星有 4 颗卫星，金星有盈亏，太阳上有黑子，并根据太阳黑子的移动测出太阳自转周期。他还看到许多用肉眼看不见的恒星，并发现银河是由繁星组成的。这些人类天文学史中的惊人发现记录在伽利略写的《星际使者》和《关于太阳黑子的信札》两本书中[①]。

1667 年牛顿亲手制造了人类第一架反射望远镜，物镜是金属球面，口径 3.3 厘米，焦距 16 厘米（光盘图 7.1.6 牛顿亲手制作的天文望远镜）。1781 年英国天文学家赫歇尔兄妹（W. Herschel 与 C. Herschel）用自制的口径 15 厘米反射望远镜发现了天王星。1845 年英国的罗斯伯爵（Third Earl of Ross）以重金建造了一架口径 1.82 米的金属面反光望远镜，镜面为 67∶33 的铜锡合金，重 3.6 吨，镜筒是木头的，长 17 米，架在自家领地花园里的两堵高墙之间，只能对仰角

① 据中国天文学史家考证，唐代成书的《开元占经》记载，战国时代的天文学家甘德曾看到“有小赤星附于其（木星）侧，是谓同盟”，即凭肉眼看到过木卫三。而太阳黑子至少在汉朝以前就被中国人凭肉眼发现，并记录在史册上。

作简单的调整，取名“利维亚坦”（Leviathan，意为巨型海兽）（光盘图 7.1.7　口径 1.82 米的罗斯望远镜）。然而就是这架古老笨拙的大望远镜发现了河外星系 M51 的旋涡结构，还看清了 M1 星云的形状像一只螃蟹，遂取名为“蟹状星云”。

1862 年美国天文望远镜专家克拉克父子（A. Clark 和 A. G. Clark）制造了第一架现代概念的天文折射望远镜，口径 47 厘米，拍到了天狼伴星的照片。1888 年和 1897 年 A. G. 克拉克相继建成了口径 91 厘米和 1.02 米的折射望远镜，分别安装在美国利克天文台和叶凯士天文台，至今仍是世界折射望远镜的冠、亚军。由于大块光学玻璃的制造和加工工艺难度太高，没有人再尝试制造更大的折射望远镜。

第一架现代概念的大型天文反射望远镜是 1908 年在美国天文学家海尔领导下制造的，口径 1.53 米，镜面是表面镀金属膜的光学玻璃，加工成旋转抛物面，配有能灵活转动的机械系统，安装在经认真选址，适宜天文观测的加利福尼亚威尔逊山上。这架望远镜首次拍到了天狼伴星的光谱，判断其为一颗白矮星。10 年以后，在海尔的主持下，威尔逊山上又架起了口径为 2.54 米，以投资者洛杉矶商人胡克（J. D. Hooker）命名的望远镜。1924 年哈勃测定仙女座星系的距离，从而结束了 170 年之久的宇宙岛之争，后来又发现了著名的哈勃关系，用的就是这架望远镜。胡克望远镜成功之后，海尔又极力奔走，筹建更大的望远镜。30 年后，1948 年终于建成了口径为 5.08 米的望远镜，矗立在观测条件更好的帕洛玛山上，其时海尔已去世 10 年。为了纪念他，这架望远镜命名为海尔望远镜（光盘图 7.1.8　5 米口径的海尔望远镜）。这架望远镜，更加开阔了天文学家的视野，测定了大批遥远天体的距离和视向速度，把人类对宇宙的探测推向深空，进入数以亿计的星系世界，使哈勃关系更加确立，上升为“哈勃定理”。海尔望远镜领先全球近半个世纪。

在人类探索宇宙的进程中，大望远镜为天文学家带来了一个又一个令人鼓舞的成果。20 世纪 60 年代以来，当代文明迅速崛起，微电子技术、计算机技术、航天技术突飞猛进之际，大望远镜制造却沉寂了 40 多年，没有新的突破。

7.1.4　大型光学望远镜的技术限制

大口径光学望远镜发展停滞，原因是在制造技术难度上受到限制，主要表现在以下两个方面。

1. 材料及加工工艺的限制

大口径光学望远镜采用反射式。主镜用整块光学玻璃，厚度通常为口径的 1/6。使用时光线只从表面反射，玻璃内部的缺陷影响不大，只需单面加工。为了减轻重量，还将背面掏挖成蜂窝状。即便如此，5 米望远镜主镜仍然自重 14.5

吨，加工前的玻璃毛坯重 59 吨。为了消除内部应力，玻璃熔炼浇铸以后需缓慢退火冷却，仅这一道工序就花费了 2 年时间。从毛坯到成品，最后的镜面加工是靠一道一道的研磨工艺完成的，研磨了整整 7 年，消耗磨料 28 吨，磨去的玻璃就有 5 吨重。抛光后镜面表面精度为波长的 1/10，即 0.05 微米，其加工难度和精度要求之高就可想而知了。

2. 机械和控制系统的限制

5 米望远镜镜筒和支架系统的可动部分重 530 吨。架起后要求望远镜能灵活运转，指向天空任一天体，而且能跟踪天体的周日视运动，保持极高的定位精度，还要考虑温度变化（天文望远镜都是在自然温度下露天观测）的影响以及当望远镜取不同位置时，重力弯沉产生的影响，对机械和控制系统的要求已达到工艺能力的极限水平，很难再有突破。苏联建成一台 6 米口径望远镜，1976 年安装在高加索帕斯托克霍夫山科学院特殊天体物理台（光盘图 7.1.9　苏联 6 米口径望远镜）。可能由于技术方面的原因，没有做出有重大价值的成果。传统结构的整块主镜面大型天文光学望远镜制造技术走到了历史的尽头。

7.1.5　全波段天文学

光学望远镜只能接收光学波段的天体辐射。5.1.1 小节已详细介绍过天体辐射的电磁波谱。光学波段尤其是可见光波段只占全部天体辐射中很小的一部分。第二次世界大战以后，用于战争的无线电技术转用于天文观测，将天文学家的视野扩展到天体辐射的无线电波段，开辟了天文学研究的新领域：射电天文学。

最早接收到天体无线电辐射的是美国贝尔研究室的无线电工程师央斯基(K. G. Jansky)。1932～1935 年，他在《无线电工程师研究会报》上发表文章，报告了他在 22 兆赫发现的来自银河系中心的无线电辐射。这一发现成为射电天文学诞生的标志。央斯基之后，最早制作天文射电望远镜并在天文学刊物上发表观测结果的是美国爱好天文的无线电工程师雷伯（G. Reber)。第二次世界大战时期，英国用雷达预防德军的空袭。1942 年 2 月的某一天，英国防空部队的所有雷达都受到强烈干扰，以为是德国发明了针锋相对的干扰技术而引起恐慌。后来才知道干扰源来自太阳，从而发现了太阳射电，揭开了射电天文学发展的序幕。

无线电波能穿透云层，所以射电望远镜不怕阴天下雨，而且不受大气散射光的影响，白天和晚上都同样可以观测。与光学望远镜相比，射电望远镜具有全天候观测的能力。星际和星系际尘埃云阻挡光线，使光学观测受到很大限制，但无线电波可以通行无阻，因而射电望远镜也加大了观测宇宙的范围。

除了可见光波段、近红外波段和射电波段以外，其余波段的电磁波辐射，都受到大气层的屏蔽作用，地面设备无法探测。能透过大气层的一部分近红外辐

射，可用地面红外望远镜进行观测，但接收器件不能用普通的照相底片和光电管，而要用特殊的红外线敏感材料，如硫化铅（PbS）和锑化铟（InSb）制作的红外探测器。为了避免地面环境和望远镜本身发出的红外线干扰，还须把探测器甚至整个望远镜都放在 77K 以下的低温深冷的条件中。

远红外线、紫外线和 X 射线、γ 射线波段的天体辐射，必须到大气层以外才能观测。开始，人们利用高空气球和火箭，携带天文仪器进行观测，1957 年人造卫星上天以后，人类进入空间时代，空间天文学蓬勃兴起。星载天文仪器、各种专用的天文卫星、宇宙飞船、轨道天文台、轨道空间站和空间望远镜都加入到天文观测的行列。从地面到空间，从波长最长的射电波到波长最短的 γ 射线，天体发出的所有电磁波辐射都成为天文学家的眼底之物，人类探测宇宙的历程发展到全波段天文学的新阶段，天文学家的视野更加广阔了。

7.2　20 世纪 90 年代的大型天文光学望远镜

7.2.1　美国的凯克（Keck Ⅰ 和 Keck Ⅱ）10 米望远镜

1990 年 11 月 24 日，在世界上海拔最高、天气条件最好的天文观测地点，美国夏威夷莫拉克亚山天文台，一架口径 10 米的天文光学望远镜的新型镜面镶拼工艺终于实验成功，拍到了第一张天体照片。1992 年 4 月 14 日，安装完最后一块镜面，望远镜全部落成，打破了光学望远镜制造历史上近半个世纪以来的沉寂。这架望远镜以其经费的主要捐赠者（捐资 9 400 万美元）企业家凯克（W. M. Keck）命名，属加利福尼亚理工学院天文系和加利福尼亚大学伯克利分校天文系共有。它的建造成功，主要是因为采用了两项重大的技术革新。

1. *薄镜镶拼技术*

10 米口径的主镜面如用传统的整块玻璃制造，厚度需 1.5 米以上，重量超过 150 吨。凯克望远镜采用薄镜镶拼技术，由 36 块六边形镜面组合而成（图 7.2.1）。中央一块六边形不装玻璃，是空的，刚好作通光孔。每块六边形镜面的直径为 1.8 米，厚度仅 10 厘米，拼合以后的整体形状仍为六边形，最大直径 10.912 米，反射面总面积 75.74 米^2。镜面总重量比使用整块厚玻璃减轻 90%，比 5 米镜的主镜还轻。镶拼技术除要求反射面精度极为精确外，还要求每一块玻璃的 6 个侧面都要精

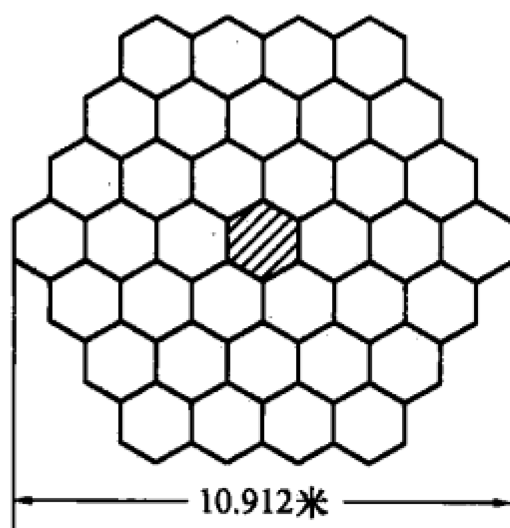


图 7.2.1　凯克望远镜主镜镶拼图

确加工，镶拼后达到与整块镜面一样的要求。大面积薄镜如何克服取不同角度时重力的弯沉变形和温度变化引起的变形呢？关键技术是主动光学系统。

2. 主动光学和自适应光学系统

当主镜面因受温度变化和重力弯沉变形时，经其反射后的光波波前阵面就会产生畸变而使成像质量变坏。单块镜面（被动光学）是靠自身的厚度和刚性来保证不让它变形，而主动光学是让它变形，然后采用主动的技术来矫正所产生的变形。矫正系统称为主动光学系统（图7.2.2）。它通过一组能够测量波前阵面畸变程度的敏感器件，由传感器将信息送进计算机，由计算机发出控制指令，在主镜后部的各个支撑点上加压或减压修正各点的局部畸变。系统连续工作，始终维持主镜面处于理想状态。此外，天体来的光线还受到大气湍流和其他因素的干扰，也会产生波前阵面的畸变，使成像质量变坏。矫正这种畸变的另一系统称为自适应光学系统，其基本原理也见图7.2.2。经望远镜聚焦后的光束在进入接收器之前，在"波前传感器"的监测下，经过一个可快速改变形状的"自适应镜面"之后再进入接收器。"波前传感器"将测到的波前阵面畸变信息送入计算机，计算机发出控制指令，使自适应镜面变形，矫正波前阵面畸变，达到成像质量优越的目的。

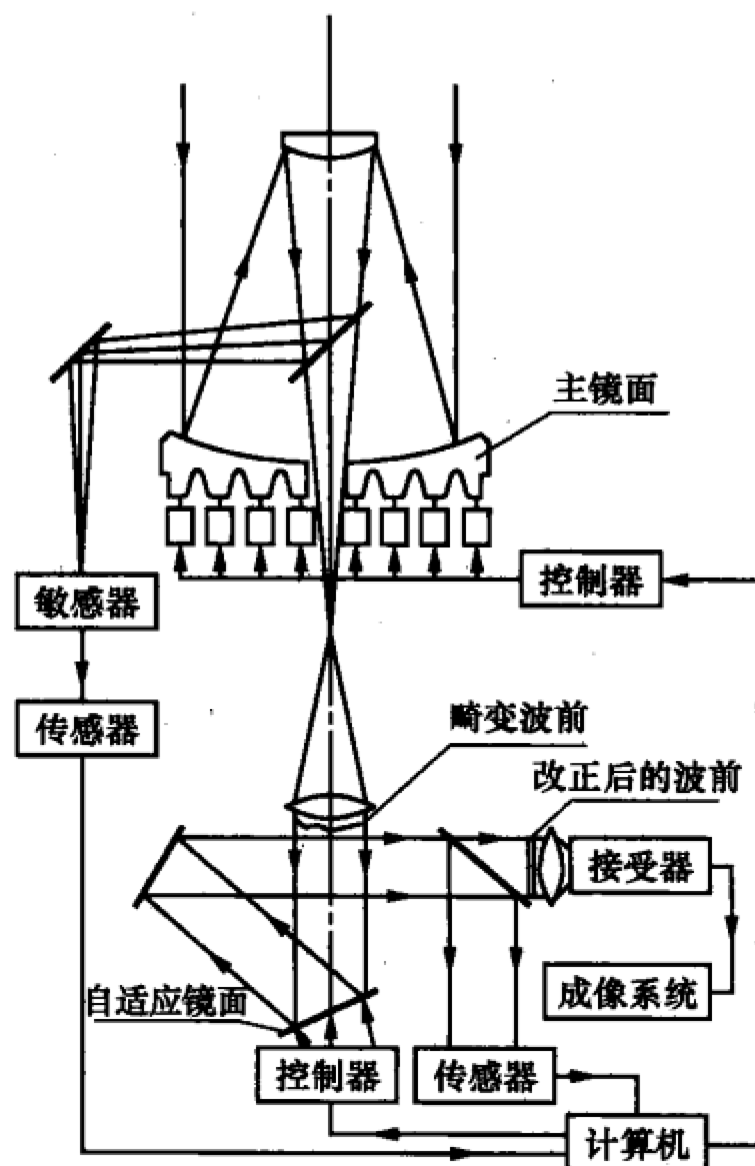


图7.2.2　主动光学与自适应系统

显然，分清两种起因不同的波前阵面畸变是很重要的，而这一点不难做到。因为大气的干扰是快速的、随机的。在一个大气质量较好的天文台台址，取较短时间，比如30秒钟之内的平均值就可以过滤掉大气湍流的影响；而玻璃变形是缓变的，不可能在短时间之内被平滑过滤，因此可以采用不同积分时间分别取样的方式。分清两种不同的畸变原因，从而可以准确地加以矫正。

薄镜镶拼技术加上主动光学和自适应光学系统的应用，使凯克望远镜一举成功。1990年11月24日，当主镜只镶拼了9块玻璃并拍出第一张成功的天体照片的时候，凯克基金会就决定再捐赠7 460万美元，建造第二台完全一样的望远镜。1992年4月14日凯克Ⅰ全部落成，1996年凯克Ⅱ也宣告落成。两台10米

口径的天文光学望远镜并立于海拔 4 200 米[①]的莫拉克亚山天文台，相距 85 米，稳坐在世界冠军的宝座上（光盘图 7.2.3　并立的两台凯克望远镜；光盘图 7.2.4　凯克望远镜光路图；光盘图 7.2.5　凯克望远镜内景）。1994 年彗星与木星相撞时，凯克Ⅰ拍下了全世界所有地面观测中质量最好的照片。

7.2.2　欧洲南方天文台甚大望远镜

甚大望远镜（very large telescope，VLT），位于南美洲智利北部拉西亚的欧洲南方天文台 ESO（European Southern Observatory），1986 年起开始研制，由四台口径均为 8.2 米的望远镜，排列在海拔 2 635 米的色拉·帕纳那尔山（Cerro Paranal）上，既能单独观测，也可以联合观测，还可以组织光学干涉观测，等效于一台口径 16 米的光学望远镜。四台望远镜分别命名为 Antu（太阳）、Kueyen（月亮）、Melipal（南十字）、Yepun（金星），另有四台口径 1.8 米的辅助望远镜，加在一起组成欧洲南方天文台甚大望远镜 VLT。如果进行联合干涉观测，则称为 VLTI（VLT interferometer）（光盘图 7.2.6　欧南台 VLT 光学望远镜内景）。

与凯克望远镜不同，他们采用单块薄镜面加主动光学技术，每块镜面厚 18 厘米，重 23 吨，曲率半径 28.975 米。整个镜面由 150 个调整点组成主动光学系统，工作波段从紫外直到中红外（0.3～24 微米）。1999 年 4 月 1 日 Antu 镜首先开光，以后陆续投入试观测，现成为目前世界上聚光能力最强的光学组合望远镜（光盘图 7.2.7　VLT 4 大 4 小 8 台望远镜组合外景图）。

7.2.3　双子星座望远镜

GEMINI 即双子星座。双子星座望远镜（GEMINI）由两台一模一样的望远镜组成，口径均为 8.1 米。一台放在智利拉西亚北面的色拉·帕穹山（Cerro Pachon），海拔 2 722 米，称为南双子（Gemini South）；另一台放在夏威夷的莫纳克亚，海拔 4 213 米，称为北双子（Gemini North）。南北联合进行观测，同时与凯克望远镜和欧南天文台的甚大望远镜相呼应，是全球唯一的分处南北半球的成对大型望远镜（光盘图 7.2.8　北双子外景；光盘图 7.2.9　南双子外景）。主镜由整块低膨胀玻璃磨制，厚 20 厘米，重 22 吨，双曲面型，由主动光学系统维持镜面精度 15.6 纳米（光盘图 7.2.10　北双子内景）。

GEMINI 是一项以美国为主的国际设备，其所有权美国占 50.1%，英国占

---

① 2002 年印度天文台在印控克什米尔海拔 4517 米的撒拉丝娃蒂山（Saraswati）安装一台美国生产的 2.01 米钱德拉光学/红外望远镜，印度政府正考虑花费 1 亿美元在这个世界最高天文台上建造一架口径 6～8 米的双筒望远镜，该地离我国边界很近。

23.8%，加拿大占15%，澳大利亚占6.2%，阿根廷占2.5%，巴西占2.4%。所在地的智利和夏威夷大学也参与分享观测时间。1993年9月开始启动，北双子于2000年，南双子于2001年建成，投入观测。

7.2.4 口径11米光谱巡天望远镜

巡天望远镜（hobby-eberly telescope，HET）是一架专门为恒星光谱巡天观测用的红外-可见光波段巨型望远镜。球面主镜由91块①直径（边到边）1米，厚52厘米的正六边形微晶玻璃镜片组成，曲率半径26米，拼合以后的整体形状仍为6边形，对角线长11米，边到边长9.8米，反射面总面积78平方米，等效口径9.2米，已于1996年12月10日开光，1997年9月拍到第一条光谱。HET位于美国得克萨斯州戴维斯堡洛克山的麦克唐纳天文台，海拔2 026米（光盘图7.2.11 HET望远镜外景）。这架望远镜的特别之处是它的镜筒用金属衍架与中央垂直轴固连成整体，光轴与垂直轴倾斜35°角，使镜筒能绕垂直轴作360°旋转，因此主镜面与镜筒受重力的情况稳定不变，不受重力弯沉的影响。麦克唐纳天文台的地理纬度是北纬30°，该地天顶点距离天赤道30°，望远镜可见天区是以天顶为圆心、以35°为半径的圆环（图7.2.12）。由于天球绕北极作周日视运动，凡赤纬在－5°至＋65°之间的天体都有机会穿过这一圆环而被观测到。观测时望远镜锁定不动，由焦面上的驱动装置实现跟踪，露光时间可长达1小时（光盘图7.2.13 HET望远镜结构图）。

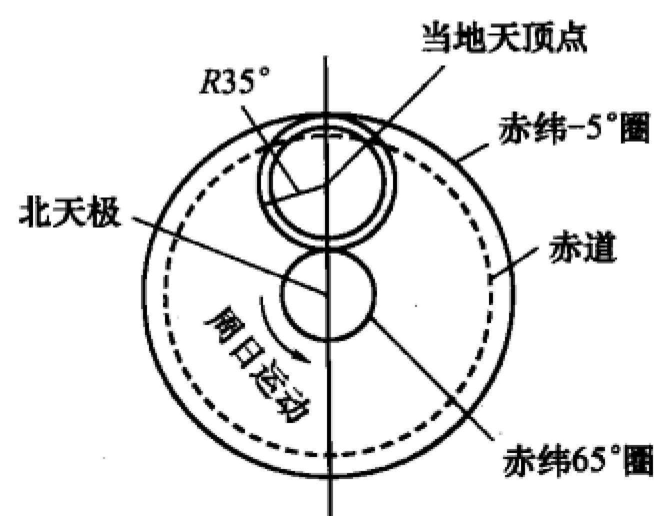


图7.2.12 HET望远镜观测天区范围

这架望远镜的特殊装置，使可观测天区中的天体只能在指定时间（刚好通过观测圆环时）观测，不能任意时间观测，这是不方便的地方。但其稳定性好，造价1 350万美元，仅为一架凯克望远镜的十分之一。

7.2.5 日本的昴星团望远镜

“SUBARU”即昴星团，取其聚合、紧密的含义。SUBARU是日本建造的望远镜，属日本国家天文台NAOJ所有，但不在日本国内，而位于美国夏威夷的莫纳克亚山上，海拔4 139米。望远镜有效口径8.2米，主镜为单块低膨胀薄镜面，厚20厘米，焦距15米，重22.8吨，也采用主动光学和自适应光学系统，

---

① 由K个正6边形拼合的图形，若仍需保持正6边形，必须满足$K=3n(n+1)+1$，$n=1, 2, 3, \cdots$。如Keck望远镜，$n=3$，$K=37$；HET望远镜，$n=5$，$K=91$。

有多台照相机和摄谱仪，工作波段从可见光直到中红外（20微米）（光盘图7.2.14　SUBARU的结构）。望远镜室为圆柱形建筑，直径40米，高43米。SUBARU望远镜1991年开始设计，1999年建成，1999年12月14日开光，获得第一条光谱（光盘图7.2.15　SUBARU的外景）。

7.2.6　美-意-德大双筒望远镜

美-意-德大双筒望远镜（large binocular telescope，LBT），是美国亚利桑那大学和意大利阿策特里（Arcetri）天文台、德国马普天文研究所合作研制的一台由两个镜筒组成的望远镜（光盘图7.2.16　LBT望远镜外景）。两个镜筒平行安装在同一支架上，每个镜筒都有一块口径8.4米的主镜，中心距14.4米，等效口径11.8米，干涉测量等效基线22.8米。每片主镜均用日本产整块玻璃磨制，中心厚度28毫米，边缘厚度894毫米，重16吨。LBT可工作在0.3～30微米可见光和红外波段，水平装置，双轴驱动跟踪，安装于美国亚利桑那州图桑市东北的格拉哈姆山国际天文台，海拔3 170米。1992年始建，2005年10月第一镜开光，2008年1月11/12日双镜开光，投资1.02亿美元（光盘图7.2.17　LBT望远镜内景）。

7.2.7　南非大望远镜

南非大望远镜（Southern African large telescope，SALT）由南非、美、德、英、波兰、新西兰联合制造，是美国HET望远镜在南半球的翻版，结构完全一样，口径11米，等效口径9.2米，工作波段0.32～2.5微米。SALT位于南非西南部萨瑟兰（Sutherland）附近的卡鲁（Karoo）高地南非天文台（SAAO），海拔1 798米，是南半球最大的光学望远镜（光盘图7.2.18　SALT外景）。SALT始建于2000年，2005年11月10日举行落成典礼，南非总统姆贝基亲自揭幕（光盘图7.2.19　姆贝基总统亲自揭幕）。南非天文台地理纬度是南纬32°23′，望远镜光轴与垂直轴固定倾斜37°角，所以当镜筒绕垂直轴作360°旋转时，望远镜可见天区是以天顶为圆心、以37°为半径的圆环。赤道方向的观测天区可到37°－32°23′＝4°37′；天极方向的观测天区可到37°＋32°23′＝69°23′，再加±6°的带宽，实际可观测天区为赤纬－75°23′～＋10°37′（光盘图7.2.20　SALT的结构）。

7.2.8　西班牙大望远镜

GTC是西班牙文gran telescopio de canarias的缩写，GTC与Keck望远镜的光学结构完全相同，主镜面由36块正六边形反射镜片组成，只是尺寸略大一些。每块镜片直径由1.8米增加到1.9米，厚8.5厘米，总通光面积84.41米^2，

等效口径10.4米。可工作在0.365～2.5微米可见光和红外波段。GTC望远镜2000年开始建造，已耗资1.3亿欧元，2007年7月13日只安装了36块镜片中的12块，举行开光典礼，开始试观测。

GTC位于加那利群岛中的拉帕尔马（La Palma）岛上，海拔2 426米。加那利群岛在非洲西北大西洋中，是西班牙的海外领土，由13个火山岛组成，距离非洲大陆最近处只有130千米。整个群岛面积7 447千米^2，人口184万，是世界著名的旅游度假胜地。群岛中的拉帕尔马岛上的ORM天文台和特内里费岛上的OT天文台，连同加那利天体物理研究所IAC（也在特内里费岛上）共同组成欧洲北方天文台ENO（European Northern Observatory），拥有60多台望远镜，分属19个国家和地区。加那利群岛与夏威夷的莫纳克亚、智利北部并列为当今世界最好的三大天文观测之都。GTC全部建成后，将超过所有已建成的8～10米级望远镜，登上世界第一的宝座（光盘图7.2.21 加那利的GTC望远镜外景；光盘图7.2.22 GTC望远镜内景）。曾宣布望远镜将于2008年5月落成，由西班牙国王胡安·卡洛斯亲自主持典礼，但至2008年底仍无消息。

7.3 20世纪90年代的大型天文射电望远镜

射电望远镜的基本原理同光学望远镜是一样的，用于收集和汇聚天体的无线电波段电磁波辐射。射电望远镜由天线、接收机、数据处理和记录显示设备构成（图7.3.1）。

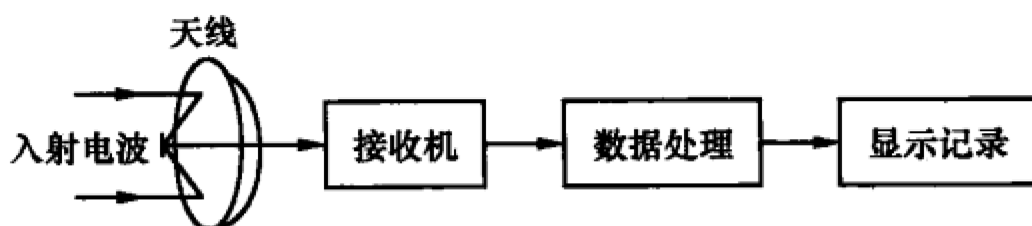


图7.3.1 射电望远镜的基本构成

天线相当于光学望远镜的主镜，尺寸越大，收集到的天体辐射越多。天线通常也设计成旋转抛物面形状，其最重要的参数也是口径大小，与光学望远镜类似。射电望远镜的基本技术指标有两条：灵敏度和分辨率。灵敏度取决于天线的有效面积、接收机与天线的抗噪声性能和信号检测能力。目前灵敏度最高的射电望远镜，有能力检测到放在月球上的普通小型无线电发射机发出的信号（带宽2兆赫，功率10^{-3}瓦）。分辨率与光学波段一样，受到衍射限制，公式仍为

$$\theta = 1.22\frac{\lambda}{D}(\text{弧度})$$

式中，λ是电磁波波长，D是接收天线口径。对于可转动选择和跟踪天体的射电望远镜，当然也需要庞大而精密的支架系统。

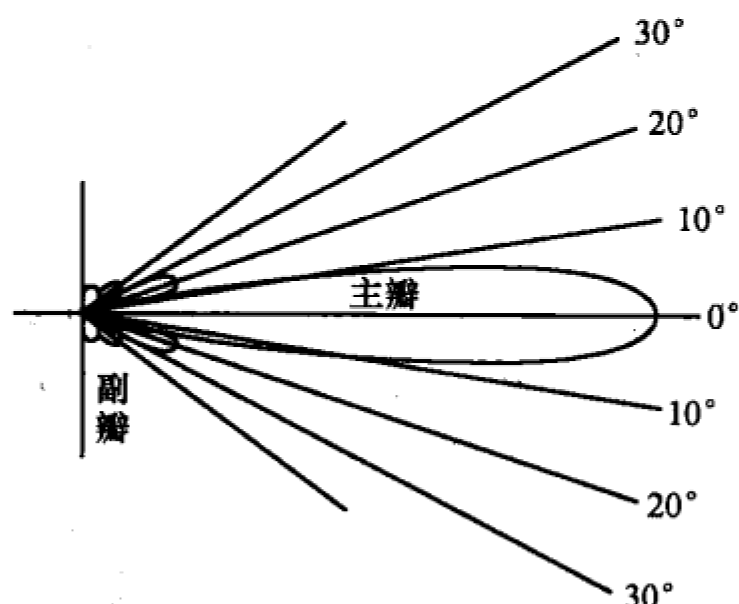


图 7.3.2　射电望远镜的方向图

由于无线电波比光波波长大1万倍至1亿倍，所以射电望远镜的分辨率比光学望远镜低得多。即使在波长较短的毫米波段，射电望远镜要达到口径5厘米光学望远镜的分辨率，天线口径也要大到500米。口径不大的单面射电望远镜不能对发出无线电波的天体准确定位，只能感知其大致所在的方向，一般用方向图来表达（图7.3.2）。图中0°方向电波反应最强烈，在其附近±10°范围内，电波反应强度的图形称为主瓣，主瓣两侧还有一些次要的反应区，称为副瓣。0°方向的定位精度比光学望远镜要低得多。

射电望远镜使天体的射电电波成像也比光学望远镜困难得多。光学望远镜能把视野里来自各个方向的天体辐射汇聚在不同的点上，在照相底片或CCD接收器的不同位置同时记录下各点的亮度，成为天体的像。而射电望远镜接收器——电波检拾器，只能检测到汇聚于一个点上的电波强度，不能检测到来自各个方向的天体辐射，如需得到观测区域内各点的强度，使之成像，只能转动天线的指向，使主瓣分别扫过各点，并逐点记录电波强度，然后再拼合成天体的射电图像，这个过程比光学望远镜的成像过程复杂得多。

20世纪50年代初，英国剑桥大学卡文迪许实验室的无线电天文学家赖尔（M. Ryle）等提出射电望远镜的综合孔径技术，即用多面天线组成射电望远镜阵，同时观测同一天区，用无线电波的干涉原理综合各望远镜的观测结果而获得天体的射电图像，视场可以很大；同时望远镜阵的总体规模相当于扩大了望远镜的总口径，使分辨率也大幅度提高。这项技术的成功应用，使赖尔获得了1974年诺贝尔物理学奖。综合孔径又称非连续孔径射电望远镜，较连续孔径的单面天线射电望远镜有明显的优势。当代大规模非连续孔径射电望远镜的分辨率已达到1″量级，可与光学望远镜相媲美，而视场可达8°～10°，比光学望远镜大多了。

两架拉开距离的射电望远镜进行干涉测量，相当于将使分辨率受到衍射限的公式中望远镜口径加大到两台望远镜之间的距离（又称基线长度）。在基线长度不太长的情况下，可用电缆线传送两架望远镜之间的观测信号。如基线很长，传输线造成的信号衰减和相位误差会影响观测精度，甚至使工作非常困难。所以一些长基线的干涉观测改用微波接力技术代替电缆线直接传输信号，基线长度可达100千米以上。近代出现的甚长基线干涉仪（VLBI），取消了彼此之间的信号联系，各自用全世界统一的、精确同步的原子钟控制观测程序，所得观测数据通过数字传输系统，送数据处理中心统一处理。这一技术可以允许进行干涉测量的

两架射电望远镜放置在地球上任意距离的地方，甚至可以放在空间轨道或月球上。1967年美国和加拿大使用这一技术已将分辨率提高到万分之几角秒，大大超过了光学望远镜观测的水平。1997年2月，日本空间局与加拿大合作，已将一台口径8米的射电望远镜发射到远地点距地面21 250千米的绕地轨道上，它与地面上的射电望远镜进行联合干涉观测，基线长度可达3.2万千米。

20世纪80年代前已经建成的单面大型天文射电望远镜有：安装在美国本土以外，西印度群岛中的波多黎各（美国属地，为美国的一个自由邦）的阿雷西博天文台，口径305米，镜面为金属板状球面，由4万块铝板拼装而成，固定式，不能转动，靠地球自转指向不同天区。周围建有3座混凝土高塔。重900吨的反射器靠3组18根8厘米粗钢缆，悬吊在137米高空、球面天线的焦点上。由26台电机控制反射器的移动，定位精度1毫米。望远镜工作波段为6米到3厘米。1963年建成，是目前世界上口径最大的射电望远镜，由康乃尔大学负责管理（光盘图7.3.3　阿雷西博305米射电望远镜）。安装在德国波恩埃费尔斯堡普朗克天文台的可跟踪式射电望远镜，口径100米，镜面为旋转抛物面，工作波段0.73米到15厘米，中间60米天线部分可延伸到3毫米波段，1971年建成。抛物面天线中央直径60米部分是金属板状结构，60米以外的部分是金属网状结构。采用保形设计技术，精巧地考虑到各构件的应力变形而设计其结构，使望远镜转至不同角度时，总体变形效果仍保持旋转抛物面的形状，只是焦距略有不同，只需对接收器的位置作适当调整即可进行正常观测。这是20世纪世界上口径最大的可跟踪式射电望远镜（光盘图7.3.4　德国口径100米射电望远镜）。

综合口径的有美国国家射电天文台的射电望远镜阵（VLA），由27台每台口径25米的射电望远镜排列在Y字形三条臂上，每臂9台，长21千米，最大干涉距离36千米，位于美国新墨西哥州的索科洛，1981年建成（光盘图7.3.5　美国VLA射电望远镜阵）。美国计划2010年以前，扩大VLA，组成新的EVLA。增加8台天线，使基线长度增至350千米，波段范围扩至30厘米到6毫米，灵敏度和分辨率提高1 000倍。

20世纪90年代新建的大型射电天文望远镜有以下几种：

7.3.1　美国甚长基线阵

甚长基线阵（very long baseline array，VLBA），这是一个跨距8 000千米，西起夏威夷莫纳克亚山，东至西印度群岛中的美属维京群岛圣克罗伊的射电望远镜组合，由10台分布全美国的口径25米射电望远镜组成，每台天线重240吨，接收机全部由液氦冷却到几开。各台望远镜用原子钟控制进行独立同步观测，控制中心在新墨西哥州索科洛，由主计算机与各站计算机联网。所有数据经高度压缩，由计算机相关器汇集到处理中心，每秒钟进行7 500次运算，构成干涉图

像，再传输到科学家使用的工作站进行分析研究。这一射电望远镜组合是美国国家设备，由自然科学基金会提供经费，国家射电天文台具体运作，对全美科学家开放使用（光盘图 7.3.6 VLBA 分布示意图）。

7.3.2 美国 110 米口径射电望远镜

110 米口径射电望远镜（green bank telescope，GBT），2002 年美国建成的一台口径 110 米×100 米可跟踪式射电望远镜，工作波段在 290 兆赫兹（波长 1.03 米）～50 吉赫兹（波长 6 毫米），并可延伸至 115 吉赫兹（波长 2.6 毫米）。GBT 采用类似主动光学的设计，其活动天线具有 2004 块可调节独立面板，通过计算机适时调整，维持整个镜面的标准抛物面面型，并能快速变焦，适应不同观测对象的要求。

GBT 身高 148 米，可动部分重 7 300 吨，但精巧灵活，可以方便的寻找和跟踪目标，定位精度 1 角秒。GBT 安装在美国西弗吉尼亚州格林班克美国国家射电天文台。这里原有一台口径 91 米、居世界第二位的可跟踪式射电望远镜，1962 年建成。在工作了 26 年之后，不幸于 1988 年 11 月 15 日突然坍塌，变成一堆废铁，是大型射电望远镜绝无仅有的一次悲剧性事件（光盘图 7.3.7 原 91 米射电望远镜；光盘图 7.3.8 91 米射电望远镜坍塌现场；光盘图 7.3.9 GBT 的全景照片；光盘图 7.3.10 GBT 与纽约自由女神像大小的对比）。

7.3.3 英国微波联线干涉网

微波联线干涉网（multi-element radio-linked interferometer network，MERLIN），由英国本土的 7 台射电望远镜组成，基线跨度 230 千米。总部在曼彻斯特焦德雷尔斑克天文台（Jodrell Bank Observatory），中心设备是英国最大口径的可跟踪式焦德雷尔斑克 76 米射电望远镜（光盘图 7.3.11 焦德雷尔斑克 76 米射电望远镜）。这台望远镜建成于 20 世纪 50 年代中期，曾在世界上独步一时，但由于旋转抛物面精度不够，工作波段只能在几十厘米以上。它与后来建成的沃德尔、德福德、诺金的 3 台口径 25 米射电望远镜，通过微波接力方式连接成干涉网，以后又扩大到 7 台，1990 年又加入一台口径 32 米，技术更先进的剑桥大学射电望远镜，组成英国微波连接干涉网。分辨率达 0″.01，工作波长最短至 13 毫米，所有接收机均在 14 开低温环境中工作（光盘图 7.3.12 MERLIN 分布图）。

7.3.4 欧洲甚长基线干涉网

欧洲甚长基线干涉网（the European VLBI network，EVN），1993 年成立，总部设在荷兰文格路天文台的欧洲甚长基线干涉网联合研究所（JIVE）。它也是

一个数据处理中心，协调处理EVN各射电天文望远镜的观测资料。EVN现已由欧洲扩大到全球范围，共有40个天文台参加，包括中国上海天文台和乌鲁木齐天文站的2台口径25米射电望远镜（光盘图7.3.13 EVN分布示意图）。

7.3.5 印度巨型米波射电望远镜阵

巨型米波射电望远镜阵（giant metrewave radio telescope，GMRT），1995年建成，由30台口径均为45米的旋转抛物面天线组成，位于印度德干高原普纳市以北80千米处，海拔650米，呈Y字形排列。16台天线沿三个臂长方向排列，每臂长25千米，另14台集中在中心区1千米范围内。这是目前亚洲最大的射电望远镜阵，工作波段0.2～6米（光盘图7.3.14 GMRT局部展示图）。

7.3.6 欧洲的低频微波阵

低频微波阵（low frequency array，LOFAR）是一种新型的米波干涉阵。第一个中心站CS-1（core station-1）已于2006年10月建成并开始工作，位于荷兰东北部爱克斯鲁（Exloo），工作波段1.25～10米（30～240兆赫兹）。LOFAR由数量巨大的简单天线构成，用高水平的IT技术控制和传输数据，被称为数字式射电望远镜阵或IT射电望远镜阵。爱克斯鲁中心站与荷兰境内的辐射站将包括25 000面简单天线，延伸350千米范围。LOFAR大面积的散布在农田中，但基本不影响农业生产（光盘图7.3.15 Exloo的LOFAR核心站CS-1）。LOFAR以后将在法、德、英、波兰、瑞典推广建设（光盘图7.3.16 LOFAR全欧洲分布图）。

另一个类似的计划MWA（murchison widefield array），将在澳大利亚西海岸距珀斯数百千米的荒凉、干燥、平坦的地方建设，工作波段1～3.75米（80～300兆赫兹）（光盘图7.3.17 MWA局部设计图）。

7.3.7 阿塔卡玛大毫米波/亚毫米波阵

阿塔卡玛大毫米波/亚毫米波阵（Atacama large millimeter/submillimeter array，ALMA），由美国、欧洲和日本共同建设。至少66台7～12米直径的毫米波/亚毫米波天线，每台相距150米，延伸方圆18千米范围，用每秒1.6亿亿（1.6×10^{16}）次计算机控制，进行综合孔径观测，有极强的成像能力。ALMA建立在智利北部阿塔卡玛（Atacama）沙漠。这里是全球最高的沙漠，海拔5 000米。具有非常好的毫米波观测条件。ALMA工作波段0.3～9.6毫米。空间分辨率0.004角秒，比EVLA（扩大的VLA）或哈勃空间望远镜提高10倍，点源观测灵敏度比EVLA高20倍（光盘图7.3.18 ALMA设想图）。

波长1～10毫米为毫米波；0.1～1毫米为亚毫米波，属于射电波与远红外

线之间的波段。发出这一波段的天体主要是宇宙中的低温物质（－250℃），包括星际分子、非常遥远的原始星系（由于红移而到达该波段）、恒星和行星的前期物质等。这一波段的电磁波容易被大气中的水分子吸收，所以要选择非常干燥的观测地点。由于信号微弱，需要很大的接收面积，而建设直径大到 1 000 米的天线，技术难度太大。ALMA 采用多天线阵干涉测量的方法。

ALMA 由美国国家射电天文台 NRAO 的 MMA、欧洲南方天文台 ESO 的 LSA、日本国家天文台 NAOJ 的 LMSA 原有的三个计划合并而成。MMA（millimeter array）是 NRAO 上世纪 80 年代的计划，40 台口径 8 米的天线原打算建在新墨西哥州，后改为建在阿塔卡玛，并吸纳加拿大 10%的投入，成为 ALMA 的一部分。LSA（large Southern array）由 ESO 领导，包括 11 个国家：英、德、法、比、意、葡、丹、芬、瑞士、瑞典、爱尔兰。LMSA（the large millimeter and submillimeter array）是 NAOJ 的计划，共有 4 台口径 12 米天线和 12 台口径 7 米天线。ALMA 总投资 10 亿美元，日本投资 3 亿美元，其中包括台湾 0.2 亿美元。建成以后按投资比例分配观测时间（作为东道国的智利享有 10%）。

2007 年 9 月 3 日已建成第一台天线（光盘图 7.3.19　已建成的 ALMA 第一台天线；光盘图 7.3.20　ALMA 天线阵），预计 2010 年开始观测，2013 年全部建成。ALMA 将成为世界上最高、最强、最大的地面射电望远镜阵。

7.3.8　其他几个毫米波/亚毫米波阵

1. 美国-台湾亚毫米波阵

亚毫米波阵（the submillimeter array，SMA），美国哈佛-史密松天体物理台（Smithsonian Astrophysical Observatory）所有，位于夏威夷莫纳克亚山半山腰，海拔 3 700 米，由 8 台口径 6 米的可移动天线组成，工作波段 0.3～1.7 毫米，空间分辨率 0.1～0.5 角秒。1992 年开始建设，1996 年，台湾中央研究院天文研究所投资 800 万美元，使原来的天线数由 6 台增加到 8 台，同时享有 15% 的观测时间。台湾部分的工作称为 SMART（Sub-Mm-ARray-Taiwan）计划。SMA 虽然规模较小，但它是世界上第一个亚毫米波阵（光盘图 7.3.21　SMA 天线阵）。

2. 美国毫米波联合阵

毫米波联合阵（combined array for research in millimeter-wave astronomy，CARMA），是由原有的两个毫米波阵合并而成：加利福尼亚州理工学院的欧文斯谷射电天文台 OVRO，6 台口径 10.4 米天线；伯克利-伊利诺伊-马里兰大学联合天文台 BIMA，9 台口径 6.1 米天线。合并后的新址位于加利福尼亚州因约

山（mountain Inyo）海拔 2 200 米，15 台天线，总面积 772 米^2，基线长 7 米～2 千米，工作波段 1～3 毫米，空间分辨率 0.1 角秒（光盘图 7.3.22 CARMA 天线阵）。2004 年开始建设，2004 年 9 月至 2005 年 7 月搬迁天线，2006 年 1 月投入工作（光盘图 7.3.23 CARMA 天线在搬迁的路上）。

3. 法-德-西毫米波研究

毫米波研究（the institut de radio astronomie millimétrique，IRAM），由法国国家研究中心 CNRS、德国马普研究所 MPG 和西班牙国家地理研究所 IGN 联合组织。拥有两个观测基地：一台口径 30 米毫米波天线，位于西班牙格拉纳达（Granada）附近的皮可维列塔（Pico Veleta），海拔 2 850 米（光盘图 7.3.24 位于西班牙的 30 米天线，）；6 台口径 15 米毫米波天线，位于法国阿尔卑斯山区的别鲁高地（Plateau de Bure），海拔 2 550 米。1985 年开始建设，1988 年建成 3 台，2005 年扩展至 6 台，基线最长 760 米，工作波段 1～3 毫米（光盘图 7.3.25 位于法国的 6 台 15 米天线）。

4. 日本野边山宇宙电波观测所

野边山宇宙电波观测所（Nobeyama Radio Observatory，NRO）日本国家天文台 NAOJ 所有，位于日本长野县南佐久郡南牧村野边山，海拔 1 349 米。由一台口径 45 米的毫米波射电望远镜和 6 台口径 10 米的毫米波阵 NMA（nobeyama millimeter array）组成。工作波段 1 毫米～1 厘米，1982 年建成（光盘图 7.3.26 日本野边山 45 米天线；光盘图 7.3.27 日本野边山 6 台 1 米天线）。

5. 墨西哥大毫米波望远镜

大毫米波望远镜（large milliment telescope，LMT；西班牙文 gran telescopio milimétrico，GTM）世界上单面口径最大、灵敏度最高的毫米波望远镜，口径 50 米，镜面面型可主动调节，工作波段 0.85～4 毫米，位于墨西哥第 5 高峰塞拉-涅格拉山，海拔 4 600 米。2006 年 11 月 22 日落成，历时 10 年，投资 1.16 亿美元。属墨西哥 LMT 天文台（70%）和美国马萨诸塞大学（30%）共有（光盘图 7.3.28 墨西哥口径 50 米大毫米波望远镜）。

7.4 空间天文探测设备

天文学是一门依赖于观测的科学。选择合适的观测台址，获得更优良的观测条件，包括晴天数、大气透明度、大气宁静度和避开夜天光的干扰等各方面，应该是非常重要的。人类第一台口径 1 米以上的望远镜，只是放在英国罗斯伯爵自

家领地的花园里（1845 年），根本没有考虑台址的选择（见 7.1.3 小节）；从美国克拉克父子制造现代概念的天文望远镜开始（1862 年），选择台址才受到高度重视。从历史上看，天文观测台址的选择经历过 4 次变迁：市内，市郊，远山、远海，太空。我国元代建立的北京建国门古观象台、17 世纪建立的英国格林尼治天文台，都建筑在首都城市；美国基特峰天文台、中国河北兴隆北京天文台，位于城市远郊；位于智利的欧洲南方天文台、夏威夷的美国莫纳克亚山天文台是远山、远海型天文台的突出代表；而太空已成为放置现代大型天文望远镜更加辽阔的场所了。就光学观测而言，目前被认为全球最优秀的天文台址有 4 处：夏威夷、智利北部、美国加利福尼亚州和位于非洲西北部大西洋上的西班牙属地加那利群岛。除夏威夷孤立于太平洋中央，又海拔 4 200 米，具有得天独厚的天文观测条件外，另 3 处的共同特点是：都位于大洋东部或大陆的西海岸边，海拔较高，大陆腹地有大片的干燥沙漠，地形和气候条件适合天文观测。但与太空相比仍是望尘莫及的。太空完全摆脱了地球大气的影响，不受白天黑夜的限制，不存在大气透明窗口的问题，可以全天候、全波段地进行观测，而且没有重力的约束，完全不需要复杂的支架系统，是最优越的天文观测场所。

太空，是指高度 400～500 千米以上的地球大气层以外的空间范围，是除陆地、海洋和大气层之外，人类活动的第四环境。太空是人造地球卫星、航天飞机、行星际宇宙飞船等人造飞行器驰骋的领域。进入太空的天文观测设备称为空间望远镜。广义的空间观测也包括气球、火箭和高空飞机上的天文观测。在天文学发展的历史上，空间天文是继光学天文和射电天文之后的第三个里程碑。

自 1957 年苏联发射第一颗人造卫星以来，截至 1996 年底，世界各国发射的宇宙飞船近 5 000 个，其中 90％是人造地球卫星。5 个空间大国所占的比例是：美国 27.5％，俄国（含苏联）68％，欧洲 1.5％，日本 1.3％，中国 0.9％。截至 2007 年底，所有宇宙飞船中与天文有关的有 400～500 个，专门从事天文学研究的空间探测器约 200 个。全球空间花费达 1.2 万～1.5 万亿美元，与天文有关的约占 10％。空间天文设备的投资约为地面天文设备的 10 倍。一些大型项目投资达几十亿美元。21 世纪，人类将实现到月球上去进行天文观测。正在酝酿中的月基天文光学望远镜口径为 16 米，预计投资 1 500 亿美元。

已经完成的比较重要的空间天文探测项目有以下几个方面：

7.4.1 苏联的载人飞行和月球探测

1957 年 10 月 4 日，苏联“卫星一号”人造卫星上天，开创了人类空间探测的新纪元；1961 年 4 月 12 日，苏联航天员加加林（Ю. А. Гагарин）乘东方一号卫星航行外层空间后安全返回地面，写下了人类进入空间的第一个记录（光盘图 7.4.1 苏联航天员加加林）。

1959 年 1 月～1976 年 8 月，苏联发射了一系列月球探测器：月球 1 号～24 号，率先进行了人类对月球的空间探测。

1959 年 1 月 2 日，苏联发射的月球 1 号超过第二宇宙速度，成为人类第一颗飞往月球的人造天体；1959 年 10 月发射的月球 3 号，首次飞越月球背面，拍摄到月球背面的照片并传回地球，使人类第一次见到从未见过的月球背面的情形（光盘图 7.4.2 人类第一张月球背面的照片）；1966 年 1 月发射的月球 9 号，于 2 月 3 日首次实现了在月球表面软着陆；1966 年 3 月发射的月球 10 号，成为第一颗人造月球卫星；月球 15 号～24 号发展为自动月球科学站，其中月球 16 号采集了 100 克月岩标本送返地球；月球 17 号和 21 号各携带一辆月球车，在地面遥控操纵下自动行驶考察月球表面，发回大量珍贵的资料照片（光盘图 7.4.3 人类第一辆月球车）。

7.4.2 美国的阿波罗登月行动

1966 年 2 月 26 日美国开始阿波罗登月行动，至 1972 年，共发射 17 艘阿波罗宇宙飞船，其中阿波罗 11 号～17 号为载人登月宇宙飞船。除阿波罗 13 号中途发生故障未能实现登月以外，其余 6 次共有 12 名航天员登月探测成功，在月面停留的时间共 300 小时 11 分 38 秒，探测时间合计 80 小时。

阿波罗宇宙飞船高 25 米，直径 10 米，重 50 吨，装载在土星 5 号三级运载火箭的顶部，火箭全高 110 米，起飞重量 3 200 多吨。飞行全过程分 8 个阶段（图 7.4.4）：①发射至一定高度后一级火箭脱离，二级火箭点火，进入离地面 180 千米的圆形轨道；②绕地飞行 1.5～2 圈后二级火箭脱离，三级火箭点火，使宇宙飞船达到第二宇宙速度，进入奔月轨道；③到达月球附近时三级火箭脱离，宇宙飞船进入距月面上空 110 千米的圆形绕月轨道；④绕月飞行 10 圈后，两名航天员乘登月舱离开宇宙飞船向月面软着陆，指挥舱留在宇宙飞船上继续绕月飞行；⑤登月舱中的航天员完成月面考察任务后乘登月舱点火起飞返回仍在绕行的宇宙飞船；⑥继续绕月飞行；⑦舍弃登月舱，宇宙飞船进入返回地球轨道返航地球；⑧接近地球大气层时，航天员乘指挥舱，舍弃宇宙飞船，张开降落伞在南太平洋溅落。登月舱外形为不规则多面体，高 9 米，直径 4 米，重 15 吨。

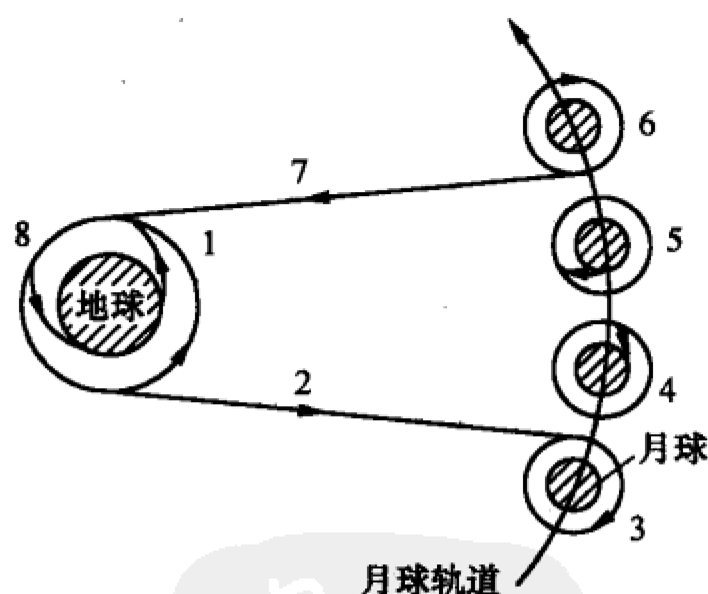


图 7.4.4 阿波罗飞船登月飞行过程

1969 年 7 月 16 日格林尼治时间 13 时 32 分阿波罗 11 号载着三名航天员阿姆

斯特朗、柯林斯（M. Collins）和阿尔德林（E. E. Aldrin）飞往月球（光盘图 7.4.5　阿波罗 11 号三名航天员）。7 月 21 日格林尼治时间 2 时 56 分，阿姆斯特朗从阿波罗 11 号的登月舱中走出来，在月面上迈出了人类登上月球的第一步，在荒凉的月面砂土上留下了人类第一个清晰的足迹（光盘图 7.4.6　人类踏上月球的第一个足迹）。

阿波罗计划共耗资 400 亿美元，完成的探测内容有：航天员在月面上步行或乘坐月球车行程 95 千米（光盘图 7.4.7　有人驾驶的美国月球车），对月面直接观测、摄影和采样；在月面上设置核动力科学实验站，对月球和近月空间进行研究；安装自动月震仪，太阳风测试仪和宇宙射线探测器；安装了供精确测量地-月距离用的月面激光反射器；带回了总重 381 千克的月球岩石和土壤样品。大量探测资料对揭示月球表面结构特征，月面物质的化学成分、光学和热力学物理特性，月球重力场、磁场和月震情况有无可比拟的价值。

7.4.3　水手号和海盗号探测器

水手号是美国向火星、金星和水星发射的行星及行星际空间探测器。1962 年 7 月～1973 年 11 月共发射 10 次。其中 1 号、2 号、5 号为金星探测器，10 号为水星＋金星探测器，其余为火星探测器。水手号对水星、金星和火星的探测表明，水星表面与月球表面相似，也有环形山，几乎没有大气，有微弱磁场；金星自转很慢，大气上空有浓密的云团；火星表面不存在传说中的“运河”，但有环形山。水手 9 号成为火星的人造卫星，绕火星飞行了一年，发回 7 329 张火星表面的照片，有清晰的河床结构，但没有水和生命存在的踪迹。

在水手号探测的基础上，1975 年美国发射了海盗 1 号和 2 号两个探测器，分别于 1976 年 7 月 20 日和 9 月 4 日在经度相差 180°的两个火星表面点软着陆。探测器装有臂长 3 米的火星土壤取样设备，对样品当场进行生物化学实验，并有对样品加热至 500℃以下任意温度的能力。探测器发回地面 4 000 多张照片，没有发现任何有机化合物。美国科学院作出非常谨慎的探测结论：“海盗号的探测结果减小了火星上有生命存在的可能性。”

在水手号探测火星的同一期间，苏联也发射了火星 1 号～7 号探测器，其中 2 号和 3 号探测器以软着陆的方式向火星表面投放了探测设备，在重量和性能方面都超过了美国，但不幸的是着陆区遇到持续数月的火星尘暴，设备遭到损坏，没有获得成功。

7.4.4　先驱者和旅行者的行星探测

“先驱者”是美国发射的另一个行星探测器系列。1958 年 10 月～1973 年 4 月共发射 11 次。前 3 次没有成功，1959 年 3 月发射的先锋 4 号开始取得部分成

功，5 号～9 号获得行星际探测资料。1972 年 3 月 2 日发射的先锋 10 号，成为人类第一个木星探测器，于 1973 年 12 月 3 日在距表面约 14 万千米处飞掠木星，同时获得木星引力场的加速，超过第三宇宙速度，于 1983 年 6 月 14 日穿越海王星轨道，1989 年 4 月越过冥王星轨道。由于近 17 年冥王星的实际位置在海王星轨道内测的一部分冥轨上，所以美国宇航局宣布，把先锋 10 号越过海王星轨道的日期——1983 年 6 月 14 日定为地球人制造的飞行器首次冲出太阳系大行星区域的正式日期。1973 年 4 月 5 日，美国又发射了先驱者 11 号。它于 1974 年 12 月 3 日从距离木星 4.6 万千米处飞过，1979 年 9 月飞掠土星，与土星的距离只有 2.1 万千米，发回了土星本体、土星光环和土星卫星的大量照片。后来，先驱者 11 号也同先驱者 10 号一样飞出了太阳系大行星区域，在更辽阔的空间遨游。在先驱者 10 号和 11 号宇宙飞船上，携带有关太阳系和地球文明的各种信息，希望未来能遇到地外智慧生命，向他们传达地球的信息（详见 11.4.2 小节）。

旅行者 1 号和 2 号是 1977 年 9 月 5 日和 8 月 20 日分别发射的另两艘行星际探测器。它们在探测完木星、土星、天王星、海王星之后，也都飞出了太阳系大行星区域。它们携带着包括 115 幅照片和图表、近 60 种人类语言、35 种地球上的自然音响、27 首音乐等地球文明的信息在空间遨游，希望与地球以外的文明建立联系。但预计它们将在 14.7 万年和 55.5 万年之后才能到达太阳系外面的另一颗恒星区域（图 7.4.8）。

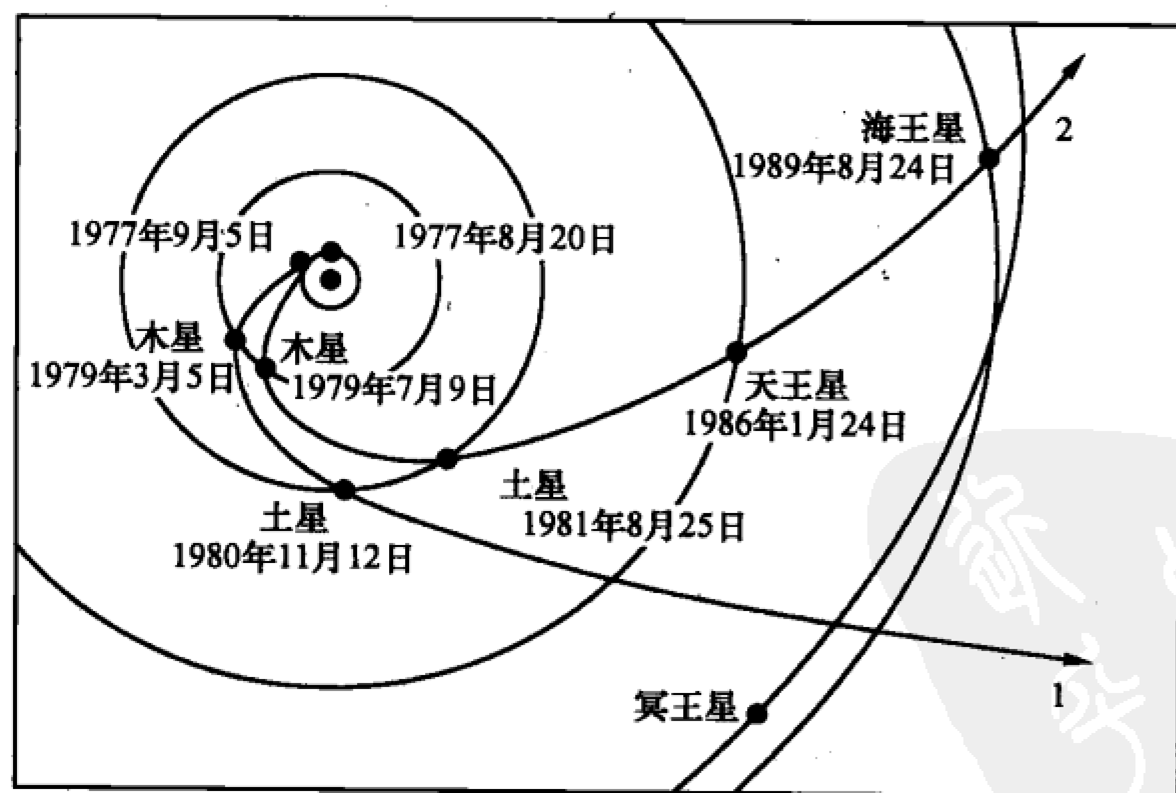


图 7.4.8 旅行者 1 号、2 号的飞行路线示意图

1998 年 2 月 17 日，旅行者 1 号已经赶上了早发射 5 年、一直跑在人类探索空间最前面的先驱者 10 号，成为向宇宙进发途中跑得最远的人造宇宙飞船。此时它们与地球的距离已达 104 亿千米，信号传递的时间需要 9 个半小时。两艘旅

行者号宇宙飞船携带着足够的动力和姿态控制推进燃料，保证它们在 2020 年之前仍能和地球保持信号联系。当然，它们携带的无线电信号发射机功率只有 20 瓦，传到地球上的信号是非常微弱的。

7.4.5　哈勃空间望远镜

哈勃空间望远镜（Hubble space telescope，HST），是一架在空间轨道上运行的天文光学望远镜，以美国天文学家哈勃的名字命名，1990 年 4 月 24 日由航天飞机发现者号送入空间。HST 运行轨道距地面 614 千米，每 96 分钟绕地球飞行一周。望远镜主镜口径 2.4 米，放在长 13 米、直径 4.3 米的镜筒中，地面重量 12.5 吨（光盘图 7.4.9　哈勃空间望远镜）。HST 通过高分辨率的电子照相机和摄谱仪，将天体的图像和光谱信息送上比它轨道更高的同步通信卫星，再下传到地面站送达美国空间望远镜研究所。由于意想不到的加工过程中一道工序发生的疏忽，在已发射上天并传回第一批照片之后，才发现光学系统有较严重的球差，照片质量不够理想。1993 年 12 月 2 日～13 日，又派出奋进号航天飞机，由 7 名航天员和工程师完成了“空间修哈勃”的壮举。其主要任务是在光路上放置一枚名为“cost”的只有分币大小的改正镜，使得“戴了隐形眼镜”的哈勃空间望远镜完全恢复了视力，拍出一张又一张高度清晰的照片，出色的执行着地面望远镜难以担负的探测使命（光盘图 7.4.10　在轨道上飞行的哈勃空间望远镜）。

HST 在空间彻底摆脱了地球大气的干扰，不受气候变化和阳光散射的影响，可以不分昼夜、不间断地连续工作，分辨角 0″.05～0″.014，波长范围 0.11～1.10 微米，包括一部分红外和紫外辐射，比地面望远镜宽 3 倍。它在空间处于失重状态，无须任何支架系统，免除了由重力引起的非刚性误差，自身定位精度 0″.01，跟踪精度 0″.007，天体位置测量精度 0″.003。HST 研制历时 13 年，投资 21 亿美元，1993 年的修理又耗资 2.5 亿美元。1997 年 2 月，7 名航天员再次对 HST 检修，并更换了一些设备，任务完成十分出色，被列为当年世界十大科技新闻之一。至 2000 年，10 年中 HST 已绕地球 58 400 圈，对 14 000 个天体拍照 33 万次，行程 24 亿千米，至今仍在超期服役中。2008 年 10 月美国计划再派航天员乘航天飞机对哈勃望远镜进行维护，但由于哈勃望远镜数据处理设备突发故障，上天维护时间推迟到 2009 年 5 月 13 日由亚特兰蒂斯号航天飞机执行，维护后的哈勃望远镜将工作到 2014 年，由新一代空间望远镜 JWST（7.5.1）接替。

7.4.6　伽利略号木星探测器和卡西尼号土星探测器

美国宇航局研制的伽利略号木星探测器于 1989 年 10 月 18 日由亚特兰蒂斯号航天飞机发射升空，沿着精心设计的借力型轨道，首先飞越金星再折返飞经地球，利用这两颗行星的引力加速，进入飞往木星的轨道，历时 6 年，长途跋涉

40亿千米，于1995年7月13日到达木星附近，将一个直径125厘米、半球形、重28千克的木星大气探测器从本体分离出来，单独向木星靠拢。经5个月时间，于12月7日以47千米/秒的速度冲入木星北纬6°左右的大气层。在降落伞缓冲之下，低速降落，发回了57分钟的探测信息，然后沉入木星大气深处，完成了人类直接考察木星大气层的历史使命。获得的有关木星大气结构、化学组成、雷电和云层等观测数据传送至本体上的数据存储器中。伽利略号探测器本体于1996年3月点燃所带发动机，进入环绕木星飞行的轨道，对木星及其卫星进行考察（光盘图7.4.11　伽利略号木星探测器）。

1996年6月27日，探测器从木卫三上空840千米处飞过，9月6日又从255千米上空再次飞过，清楚地看到了覆盖木卫三表面的冰层和冰盖下环形山及褶皱的图案。科学家们推测，在冰盖下存在厚厚的液态氧层，氧含量与地球大气中的氧含量大致相当。考察还发现比木卫三距离木星更近的木卫二表面也覆盖着冰层，但冰面上可能存在液态水和浮冰，冰盖下面则是大量的液态水，水下隐藏着海底火山，不时提供一定的热量。人们据此猜测木卫二的海洋中可能有微生物存活（光盘图7.4.12　表面覆盖着冰层的木卫二）。这一问题有待于今后更深入的探测才能作出回答。离木星最近的木卫一是太阳系所有行星、卫星中火山活动最活跃的天体。1997年3月和6月，伽利略号探测器拍到了正在喷发的火山照片，高温岩浆温度超过1 500开（光盘图7.4.13　火山活动活跃的木卫一）。伽利略号探测器还对术星本体，特别是其大红斑进行了近距离拍摄。2003年9月21日下午（北京时间9月22日凌晨），伽利略号探测器按预定计划撞向木星，结束了8年的木星探测使命。

卡西尼号是美国发射的土星探测器。于1997年10月15日美国东部时间4时43分由大力神火箭送入空间。卡西尼号也采用像伽利略号一样的借力型轨道：发射后先飞向金星，1998年4月经过金星后再绕过太阳，1999年6月再次经过金星，1999年8月经过地球，2001年1月经过木星，由这些行星给予重力加速作用，再奔向飞往土星的航程，2004年7月进入环绕土星轨道，2004年7月1日穿环而过，进行为时4年的土星本体、土星环和卫星系统的探测（光盘图7.4.14　卡西尼号土星探测器）。

卡西尼号探测器长7米，直径3米，地面重量6.4吨，携带27件有多种功能的探测设备，总投资34亿美元，是一项以美国宇航局和欧洲空间局为主的国际合作项目。它的任务除对土星进行全面考察外，还重点探测神秘的土星光环和名为“泰坦”的土卫六。泰坦是太阳系中第二大卫星，直径5 150千米，仅次于木卫三，有厚厚的大气层，表面物理条件类似于原始地球。天文学家希望探测到泰坦上是否有生命存在的信息。卡西尼号携带着专门探测泰坦的惠更斯着陆器，直径2.7米，地面重量350千克，由欧洲空间局制造。2005年1月14日世界时

16 时 19 分，“惠更斯号”开始向土卫六降落，90 分钟后，完成历史使命，葬身于泰坦卫星上。在降落过程中发回了宝贵的探测信息（光盘图 7.4.15　惠更斯号拍摄的最后一张照片）。美国宇航局 2008 年 2 月 13 日发布卡西尼飞船最新观测成果，卡西尼的雷达设备已测绘出土卫六表面大约 20%的面积。科学家们发现了几百个湖海，其中有的湖海液态甲烷和乙烷含量据估计要超过地球已探明的油气总储量。他们据此推算，土卫六的液态碳氢化合物总量是地球已探明油气总量的数百倍。

7.4.7　信使号的水星探测

2004 年 8 月 3 日，美国宇航局发射了信使号水星探测器（MESSENGER mission to Mercury）（光盘图 7.4.16　信使号水星探测器）。为节省燃料避免强力减速，不直接飞往水星而是绕太阳掠过地球和金星，逐渐变轨为绕水星探测。2005 年 8 月飞掠地球，2006 年 10 月和 2007 年 6 月两次飞掠金星，2008 年 1 月首次飞掠水星。2008 年 10 月 6 日二次飞掠水星时开始拍摄水星照片，已拍摄 1 000多张（光盘图 7.4.17　2008 年 10 月 7 日拍摄的水星环形山照片）。预计 2009 年 9 月信使号再次飞掠水星后，将于 2011 年 3 月正式进入环绕水星的轨道，至 2013 年结束探测。

7.4.8　新一轮的火星探测

美国新一轮的火星探测 10 年计划从 1996 年开始执行，共分 5 步。每一步都由两个配套项目组成。1996 年 11 月 7 日，发射“火星全球勘测者”，于 1997 年 9 月 12 日到达火星上空，进入环绕火星两极的轨道，距火星表面 380 千米，拍摄高分辨率的照片传回地球，全面勘察火星的大气、磁场、地貌等。与之配套的“火星探路者”则登临火星表面进行局部的深入勘察。1996 年 12 月 4 日“火星探路者”发射升空，1997 年 7 月 4 日到达火星上空。在反推器点火减速后，以每秒 6.3 千米的速度进入火星大气层。在大气层中张开降落伞。临着陆前，保护气囊自动充气，重 264 千克的着陆器缓缓降落，接触火星表面后弹跳冲击约 1 小时，最终静止在火星表面的阿瑞斯平原上。紧接着着陆器缓缓张开像莲花瓣似的三片太阳能电池帆板，一辆精致的火星车“索杰纳”开到火星表面上（光盘图 7.4.18　索杰纳开到火星表面上）。索杰纳身高 0.3 米，长 0.65 米，宽 0.48 米，地面体重 10.4 千克，装有 6 只小巧灵活的车轮，每分钟行驶 1 米，造价 2 500 万美元，能够自动绕过较大的障碍物，行动自如，既稳健又轻捷。它的主要使命是收集火星表面的岩石和土壤样品，当场分析它们的化学成分，然后将分析结果发回地球。火星探路者登临火星的全过程，索杰纳在火星上跋涉的娇小玲珑的身影通过卫星电视适时传播到全世界每一台电视机上，令数十亿观众瞩目观看，惊叹

不已。火星探路者成功地在火星表面勘察的壮举被评为1997年世界十大科技新闻的第一条。索杰纳分析的结果，火星岩石和地球岩石一样也是氧化硅化合物。火星表面明显地分布着大量洪水冲刷的河床痕迹，说明火星在历史上曾有过大量的氧气和液态水。而现在，河流都干涸了，火星表面找不到液态水，大气中也没有氧气，更没有发现任何有机物。这自然使人联想起火星的过去和地球的未来。这一对在太阳系中有许多方面都最相似的行星，在孕育生命这方面有什么共同性和不同之处呢？这也是人类探测火星最关心的问题。

火星探测的第二步，于1998年12月11日发射了“火星气候轨道探测器”，1999年1月4日发射“火星极地着陆探测器”登临火星南极地区，携带能深入地下几米的探头进行探测，主要考察火星表面和大气中水分的含量。第三步，于2001年3月发射“勘测者2001轨道船”，4月发射“勘测者2001登陆艇”，携带一辆比索杰纳更先进的火星车，探察着陆点周围30多千米的范围。第四步，于2003年发射一对2003轨道船和2003登陆艇，研究和实验将采集到的火星样品带回地球的技术问题。第五步，于2005年发射最后一对轨道船和登陆艇，完成将火星样品带回地球的任务。可惜，1999年1月发射的“火星极地着陆探测器”在1999年12月到达火星上空后，因与地面失去联系而丢失了。“火星气候轨道探测器”也因一些不该犯的技术错误而偏离了轨道，于1999年9月失踪，原先的计划被修改执行。

2003年6月2日，欧洲空间局发射了“火星快车”探测设备，包括轨道飞行器和“猎兔犬2号”登陆器。2003年12月“猎兔犬2号”失踪，“火星快车”仍然正常工作，发回了许多高清晰度火星照片。光盘图7.4.19是2004年5月28日拍摄的火星水手谷照片，河床景观历历在目（光盘图7.4.19　火星水手谷）。

2003年6月10日和7月7日，美国分别发射的勇气号和机遇号，先后于2004年1月4日和25日登陆火星。两者完全相同，长1.6米，宽2.4米，高1.5米，地面重174千克，行进速度每秒5厘米（光盘图7.4.20　勇气号火星探测器）。勇气号和机遇号的探测发现了更多火星曾经有大量水的证据，但没有发现液态水。

2007年8月4日，美国宇航局发射了“凤凰号”探测器（phoenix Mars mission），于2008年5月25日着陆在火星北半球纬度68°、经度233°北极地区，主要任务是通过土壤的挖掘、分析，研究火星水的历史、火星气候的变迁和冰雪覆盖条件下生命存在的可能性（光盘图7.4.21　着陆后的“凤凰号”示意图）。“凤凰号”的着陆没有采用气囊弹跳，而采用反推器点火减速加降落伞的方法。降落过程由欧洲的“火星快车”、美国的“勘测者轨道船”和“2001火星奥德赛”三艘火星在轨飞船进行监测。“2001火星奥德赛”（2001 Mars Odyssey）

2001年4月7日发射（光盘图7.4.22　2001火星奥德赛），曾通过γ射线谱仪，对火星北极区水冰分布的情况作过探测（光盘图7.4.23　火星北极区水冰分布的情况）。"凤凰号"作出大量探测工作后（光盘图7.4.24　凤凰号拍摄的火星北极区地貌；光盘图7.4.25　凤凰号拍摄的火星北极区土壤水冰），已于2008年11月10日停止工作，完成任务。凤凰号火星探测器项目小组在新闻发布会上说，凤凰号的机械臂2008年7月30日把一份土壤样本递送到"热量和释出气体分析仪"中。在样本加热时，分析仪鉴别出其中有水蒸气产生。这是迄今为止火星上存在水的最直接证据。凤凰号对土壤的分析也表明，火星土壤能够维持生命生存。此外，凤凰号还在火星上观察到了霜冻现象，并在高空云层中观察到了降雪。

除美国外，俄罗斯、中国和日本也有新的探测火星的计划。预计未来20年内，人类将实现航天员登上火星的壮举。

7.4.9　20世纪90年代以后轨道上的其他天文探测设备

1990年升空，正在轨道上运行的哈勃空间望远镜是美国宇航局"大天文台计划"(great-observatories) 中4台大型空间探测设备中的第一台。另三台如下所述：

(1) 康普顿γ射线空间天文台 (Compton Gamma Ray Observatory, CGRO)，由美国戈达德空间飞行中心高能天体物理实验室研制，1979年开始设计，1991年4月5日由大西洋号航天飞机送上轨道。CGRO的主要任务是进行γ射线波段的巡天观测，发现和搜寻宇宙中的γ射线源，对较强的γ射线源进行高灵敏度、高分辨率的成像、能谱和光变测量。γ射线是天体辐射中能量最高的电磁辐射波，由于地球大气的屏蔽作用，在地面上不可能进行观测。CGRO入轨后，运行情况良好，主要仪器达到或超过了设计指标，连续测到了近800个宇宙γ射线暴（γ射线集中爆发的现象，见10.7节），对宇宙结构的理论研究有非常重要的价值。CGRO已于2000年6月4日回归大气层，解体后陨落于太平洋中（光盘图7.4.26　康普顿γ射线空间天文台CGRO）。

(2) 钱德拉X射线空间天文台 (Chandra)。原名高能X射线天体物理实验室 (AXAF)，1977年开始由美国休斯公司、宾州大学、麻省理工学院和戈达德空间飞行中心联合研制，投资30亿美元。主要任务是以前所未有的高分辨率认证宇宙中的X射线源天体，拍摄其X射线光谱。这对于恒星晚期演化过程，特别是对暗物质及黑洞探测有极其重要的意义。于发射前夕为纪念已故美籍印度天文学家钱德拉塞卡 (S. Chandrasekhar) 而改用新名。1999年7月23日Chandra由哥伦比亚号航天飞机送入空间，轨道远地点14万千米，近地点1万千米。Chandra总长17.4米，重21吨，是迄今最大、最重、最昂贵的天文探测卫星（光盘图7.4.27　钱德拉X射线空间天文台Chandra）。

(3) 斯必泽空间红外望远镜（Spitzer）。原名 SIRTF，计划 1999 年发射升空，送至远地点距地面 10 万千米以上的轨道。其主体是一架口径 0.85 米，完全由液氦致冷的红外望远镜，工作在 3～180 微米波段，投资 13 亿美元。主要任务是对恒星和星系早期演化进行研究，探测大红移红外星系，探测质量在 0.08$M_{\odot}$ 以下，介于恒星和行星之间的“褐矮星”以及邻近恒星的看不见的暗伴星等低温天体。原计划延迟至 2003 年 8 月 25 日升空，为纪念已故普林斯顿大学教授、最早提出空间天文建议的斯必泽（L. Spitzer）而命名（光盘图 7.4.28 斯必泽空间红外望远镜 Spitzer）。

除以上所列属于美国宇航局“大天文台计划”中的大型空间探测项目之外，还有以下几种：

(1) 新一代 γ 射线望远镜（international gamma-ray astrophysics laboratory，INTEGRAL），欧、美、俄联合大型空间探测设备，由欧洲空间局（ESA）和美国宇航局联合研制，用俄罗斯运载火箭于 2002 年 10 月 17 日送入空间。轨道近地点 9 000 千米，远地点 15.3 万千米，比 CGRO 的轨道高得多。高轨道的好处是可以避免地球附近太阳风辐射带的影响。INTEGRAL 在探测灵敏度、成像质量和分辨率等方面都超过已经陨落的 CGRO（光盘图 7.4.29 新一代 γ 射线望远镜 INTEGRAL）。

(2) 远紫外光谱探测卫星（far ultraviolet spectroscopic explorer，FUSE），由美国科罗拉多大学和加利福尼亚大学研制。主体是一架口径为 0.7 米的远紫外望远镜，主要在 0.09～0.12 微米波段工作，角分辨率 1″，光谱相对鉴别率达 0.000 3，重量约 1 吨，1999 年 6 月 24 日由德耳塔火箭发射升空。其主要任务是研究宇宙中元素的丰度、星际介质和恒星大气（光盘图 7.4.30 远紫外光谱探测卫星 FUSE）。

(3) 太阳和太阳风层探测器（solar and heliospheric observatory，SOHO）欧洲和美国联合的太阳观测设备，1995 年 12 月 2 日发射，简称 SOHO 卫星。尺寸 4.3 米×2.7 米×3.7 米，太阳能电池板翼展 9 米，有效载荷 610 千克，位于地球与太阳之间的拉格朗日 L1 点上，距离地球 149 万千米，与地球、太阳相对位置保持不变地绕太阳公转，24 小时不间断地监测太阳的活动，成为获取太阳信息最丰富的探测卫星（光盘图 7.4.31 太阳和太阳风层探测器 SOHO）。

(4) 意-荷 γ-X 射线探测卫星（BeppoSAX）。Beppo 是意大利天文学家，SAX 是“satellite for x-ray astronomy”的缩写，1996 年 4 月 30 日发射，离地面高度 600 千米，轨道倾角 3°.9，2002 年 4 月 30 日停止工作。整整 6 年，观测 1 500 次，发现 50 起重要的 γ 射线暴（光盘图 7.4.32 γ-X 射线探测卫星 BeppoSAX）。

(5) 牛顿 X 射线多镜面空间望远镜（Newton X-ray multi-mirror，Newton-

XMM)。NASA与ESA合作，1999年12月10日由ESA发射，与Chandra功能大体相同。长10米，重3.8吨，轨道远地点11万千米，48小时绕地球一圈(光盘图7.4.33 牛顿X射线多镜面空间望远镜Newton-XMM)。

(6) 宇宙微波各向异性探测器（Wilkinson microwave anisotropy probe, WMAP)。Wilkinson是普林斯顿大学的宇宙学家。WMAP 2001年6月30日NASA发射，位于地球背向太阳一侧的拉格朗日L2点上，距离地球150万千米，与地球、太阳相对位置保持不变地绕太阳公转。重840千克，入轨以后张开巨大的纯金制造的遮阳伞，保持温度90开（光盘图4.2.4 宇宙微波各向异性探测器WMAP)。

其他的空间天文设备还有：1970年发射的自由号X射线天文卫星（Uhuru)、1978年发射的国际紫外卫星（IUE)、1983年发射的红外天文卫星(IRAS)、1989年发射的宇宙背景探测卫星（COBE)、1989年发射的天体测量卫星（Hipparcos)、1989年发射的法-俄硬X射线探测器（SIGMA/GRANAT)、1990年发射的德-英-美伦琴X射线卫星（ROSAT)、1992年发射的远紫外探测卫星（EUVE）以及2000年10月发射的美-日-意-法高能暂现源探测器(HETE-2)、2004年11月发射的美-英-意雨燕号γ射线暴探测卫星（Swift)、2006年9月22日日本发射的太阳观测卫星（Hinode)、2006年10月25日美国发射的日地关系探测卫星（STEREO）等。

7.5 21世纪的天文望远镜计划

21世纪人类将斥巨资建造多项大型天文观测设备，总体目标可归纳为以下方面：

(1) 决定宇宙的大尺度特性，宇宙的年龄，组成宇宙的物质和能量的性质；
(2) 研究近代宇宙的发端，即第一批恒星和星系形成的时代；
(3) 了解各种尺度黑洞的形成和演化；
(4) 研究恒星及行星系统的形成，巨行星和类地行星的诞生和演化；
(5) 地外生命和文明的探测；
(6) 了解天文环境对地球的影响。

美国国家研究理事会于2001年发表《新千年天文学和天体物理学》研究报告曾提出未来10年（2000～2010年）优先启动的地面和空间天文望远镜计划，后来又有一些补充修改，已超出2010年时限。美国以外的国家也陆续公布一些大型天文观测项目，主要有以下几个方面：

7.5.1 新一代空间望远镜

新一代空间望远镜（James Webb spase telescope, JWST）原定名NGST,

8米口径，计划投资10亿美元，是美国NASA取代哈勃望远镜的新一代空间望远镜。2002年，为纪念NASA第二任局长、阿波罗计划领导人J. E. Webb，决定改名为詹姆斯韦伯空间望远镜；口径改为6.5米，主镜由18面6边形子镜构成，重705千克，工作波段0.6～28微米。计划2013年6月发射到距地球150万千米的L2点上，带有22米×12米的遮阳伞，保持温度30～60开（光盘图7.5.1 JWST设想图；光盘图7.5.2 JWST与HST镜面大小比较图）。

7.5.2 星座式X射线天文台

星座式X射线天文台（constellation X-ray observatory，Con-X）由美国NASA发射。这是一组空间X射线望远镜阵，至少4台类似Chandra或Newton-XMM的X射线望远镜，发射到*L2*点上，紧密联合观测，像是天上的一个星座。主要目标为研究巨型黑洞、星系形成、暗物质、暗能量，计划投资8亿美元。光盘图7.5.3和光盘图7.5.4是2004年公布的Con-X轨道图和望远镜阵设想图（光盘图7.5.3 Con-X轨道图；光盘图7.5.4 2004年公布的Con-X望远镜阵设想图）。2006年修改设计方案，将4台口径1.3米的X射线望远镜放置在一个镜筒内，执行不同的观测任务，工作波段0.3～40千电子伏特，涵盖大部分软X射线望和部分硬X射线（光盘图7.5.5 2006年公布的Con-X望远镜阵设想图）。

7.5.3 大型综合巡天望远镜

大型综合巡天望远镜（large synoptic survey telescope，LSST）是一架特殊设计的，由三块反射镜面组成的大视场巡天望远镜，将建于智利色拉·帕穹山（Cerro Pachon），海拔2 722米，那里已有一架口径8米的南双子望远镜（光盘图7.5.6 LSST的外景设计图）。LSST的三块镜面分别为：口径8.4米的M1、3.4米的M2以及5.0米的M3。M1与M3在同一块镜坯上加工完成，M1镜为外环部分，M3镜为内环部分，中央孔挖掉了无用部分为减轻重量及吊装方便（光盘图7.5.7 LSST的光路图）。天体的光从M1镜反射到M2镜，再反射到M3镜，再反射到焦面上，焦距10.36米。在焦面之前，还有两组改正透镜，使焦面成为平面。焦面直径64厘米，CCD阵列32亿像素，视场9.6平方度，被誉为世界上像素最高的数码相机，总造价3亿美元。2008年9月18日，重达23.5吨的M1/M3镜坯浇铸和冷却工序已完成（光盘图7.5.8 浇铸完成的LSST M1/M3主镜坯）。

LSST计划2012年建成，2014年投入工作，每15秒拍摄一张照片，三个夜晚便能覆盖全天。LSST的主要研究对象是：暗物质和暗能量（详见12.8节）、正在爆发的超新星、深空天体的引力透镜效应（详见10.8）、银河系的结构、柯

依伯带天体和近地小行星（光盘图 7.5.9　LSST 的招贴画）。

7.5.4　30 米口径地面光学望远镜

30 米口径地面光学望远镜（thirty meter telescope，TMT），原定名 GSMT——giant segmented mirror telescope，计划投资 3.5 亿美元，与 JWST、ALMA 并列为未来 3 大天文设备，30 米口径，工作在光学和红外波段。光盘图 7.5.10 是美国大学天文联盟（AURA）提出的 GSMT 设想图（光盘图 7.5.10　GSMT 设想图）。2003 年 6 月，AURA 联合加拿大大学天文联盟（ACURA）、加利福尼亚州理工学院、加利福尼亚州大学成立新的 TMT 计划，重新考虑 30 米口径地面光学望远镜的设计建造问题。2003 年 10 月 Moore 基金会出资 3 500 万美元，2005 年 2 月 ACURA 出资 1 000 万加元作为启动资金，2006 年 5 月完成概念设计，计划 2010 年开始建设，2017 年 10 月开光，2018 年 6 月投入工作。Moore 基金会已投入 2 亿美元、加利福尼亚州理工学院和加利福尼亚州大学投入 0.5 亿美元建设费，总共已投入 3.8 亿美元。（光盘图 7.5.11　TMT 与帕洛玛 5 米望远镜大小之比较）。TMT 主镜直径 30 米，原设计由 738 块 6 边形子镜组成，每块直径 1.2 米，2007 年修改为 492 块，每块直径 1.45 米，厚 45 毫米，工作波长 0.3～30 微米，视场 20 角分（光盘图 7.5.12　TMT 装置设想图）。2007 年 7 月已选定放置地点：智利北部塞洛阿尔玛宗内（Cerro Armazones）或夏威夷莫纳克亚（光盘图 7.5.13　TMT 外景设想图）。

另一台地面巨型拼接镜面望远镜计划——大麦哲伦望远镜（giant Magellan telescope，GMT）由卡内基天文台（Carnegie Observatories）与哈佛大学、麻省理工学院、施密松天文台、德州大学、亚利桑那大学、密执根大学等协作正在实施。卡内基天文台是美国加利福尼亚州威尔逊山和帕洛玛山天文台的联合体。1969 年开始在智利北部拉斯坎帕纳斯（Las Campanas）建设南方天文台，已建成 2.5 米、1 米和两台并列的 6.5 米望远镜。GMT 将由 7 面拼接型 8.4 米镜组成，总直径 24.5 米，工作在光学和红外波段，预计 2016 年建成。拉斯坎帕纳斯天文台海拔 2 400 米，与海拔 5 000 米的大毫米波阵（ALMA）相距不远（光盘图 7.5.14　GMT 设想图；光盘图 7.5.15　GMT 外景设想图）。

7.5.5　美-加-澳 42 米大望远镜

美-加-澳 42 米大望远镜（the large aperture mirror array telescope，LAMA）是美国哥伦比亚大学、美国纽约州立大学、加拿大英属哥伦比亚大学和澳大利亚新南威尔士大学等共同提出的大望远镜计划。LAMA 由 18 个 10 米直径的圆形镜片装在一个镜架上，整体直径 54 米，通光面积 1 414 米^2，等效口径 42.4 米，只观测距天顶 4°的天区，视场 1 角分，工作波段 0.5～2.5 微米，放置在智利北

部或美国新墨西哥州（光盘图7.5.16　LAMA主镜面设想图）。

7.5.6　先进空地射电干涉仪

先进空地射电干涉仪（advanced radio interferometry between space and earth，ARISE）是一架25米口径的高灵敏度空间射电望远镜，绕地球椭圆轨道，最大高度5万千米，工作波段最短3毫米，由NASA发射，与美国的地面甚长基线干涉仪VLBI（以欧洲为主的全球VLBI网络称为EVN）相连接，但角分辨率比VLBI提高6倍，计划投资3.5亿美元。主要目标为研究活动星系核，巨型黑洞附近的喷流，分子天文学等。

7.5.7　γ射线大面积空间望远镜

γ射线大面积空间望远镜（gama-ray large area space telescope，GLAST）是功能强大的γ射线望远镜，灵敏度比CGRO高50倍，工作波段10兆赫兹～300吉赫兹，由美、法、德、日、意、瑞典共同建造，投资3亿美元。原计划2006年发射，实际发射于2008年6月11日，轨道高度565千米，倾角28°.5。主要目标为研究γ射线暴、巨型黑洞附近的喷流、暗物质与宇宙膨胀的加速机制等，是目前最高端光子能量的探测设备（光盘图7.5.17　GLAST宣传画；光盘图7.5.18　GLAST发射实景）。

7.5.8　太阳动力学天文台

太阳动力学天文台（solar dynamics observatory，SDO）是美国第一个研究空间天气的网络空间设备，将发射到与地球自转同步的轨道上，与位于新墨西哥州的地面站相对固定。主要目标为研究太阳磁场、太阳黑子、耀斑和日冕物质抛射以及与人类活动有关的空间天气等。SDO大小为4.5米×2米×2米，太阳能帆板6.5米，计划将延迟到2009年10月8日至11月6日之间发射，发射重量3 100千克，有效载荷270千克，投资3亿美元（光盘图7.5.19　SDO外貌）。

7.5.9　空间激光干涉仪

空间激光干涉仪（laser interferometer space antenna，LISA）是第一个直接测量引力波的空间设备，美国宇航局和欧洲空间局合作研制。LISA由3架飞行器组成等边三角形，边长500万千米（光盘图7.5.20　空间激光干涉仪），中心点位于地球公转轨道上，滞后地球5 200万千米（对太阳角距20°），追随地球绕太阳同步公转。等边三角形平面与黄道倾斜60°，与地球赤道接近垂直（光盘图7.5.21　LISA的运行轨道）。每架飞行器直径2.7米，厚0.7米，质量575千克，各有两台口径40厘米的望远镜和两台钇钕石榴石激光器，功率1瓦，波长

1 064 纳米，相互发射和接受激光束，进行干涉测量。主要目标为有引力波发射的河内天体：密近双星、白矮星、中子星、黑洞；河外天体：活动星系核、巨型黑洞。计划 2015 年发射，投资 2.5 亿美元。

7.5.10　开普勒类地行星探测飞船

开普勒类地行星探测飞船（Kepler spacecraft，Kepler）属于美国 NASA 专门探测太阳系外行星的计划，已于 2009 年 3 月 7 日发射，施密特光学系统，口径 0.95/1.4 米，视场 15°（光盘图 7.5.22　正在装配中的 Kepler 飞船）。用德尔塔火箭发射到跟随地球的绕日轨道上，轨道周期 372.5 天，正式工作 3.5～6 年，4 年后将滞后地球 0.5 天文单位（光盘图 7.5.23　Kepler 4 年飞行轨道图）。Kepler 观测的对象是指定天区中的天体，选择天鹅-天琴座之间 21 块正方形天区（光盘图 7.5.24　Kepler 的观测天区），42 片 2 200×1 024CCD，用高灵敏度测光技术，发现行星遮掩恒星的过程。选择这一天区是考虑：在银道面附近，没有太亮的恒星，少受太阳光的干扰，避开小行星带和柯伊伯带。这一天区约有暗至 18 等恒星 22.3 万颗，期望能找到 45 颗以上<1.3 地球半径的类地行星。

7.5.11　类地行星搜寻者

类地行星搜寻者（terrestrial planet finder，TPF）是美国 NASA 专门探测太阳系外行星的“空间红外干涉仪”。主要目标为探测类似地球这样的行星，并分析行星大气的红外辐射以确定它们的化学成分，探测水、臭氧、二氧化碳、甲烷等与生命有关的气体物质。2004 年 5 月宣布的 TPF 方案是，分两组分别发射：第一组是一台可见光波段的日冕仪（TPF-C），2014 年发射（光盘图 7.5.25　空间红外干涉仪 TPF-C）；第二组是四架或多架 3.5 米级红外望远镜（TPF-I），相互距离在 10 米至 1 000 米之间可调，进行高精度的干涉测量，2020 年发射（光盘图 7.5.26　空间红外干涉仪 TPF-I）。计划投资 2 亿美元。

7.5.12　欧洲的新天体测量卫星

欧洲的新天体测量卫星（GAIA）是欧洲空间局的新一代天体测量卫星，不同于别的空间设备，名称 GAIA 不是缩写字，而是全称——希腊女神的名字。GAIA 继承 1989 年发射的依巴谷天体测量卫星（见 5.2 节）的任务，主要目标是高精度的测量暗至 20 等的所有天体的位置和运动，其中 15 等以上的精度达到 24 微角秒，这相当于一根头发丝直径放在 100 千米远处的张角（伊巴谷卫星最暗测到 9 等，精度 1 毫角秒）。GAIA 还将测量暗至 17 等天体的自行、视向速度、光谱和光度数据。测量对象中有恒星 10 亿颗，包括褐矮星、变星、超新星，还有星系、类星体等深空天体以及 1 万以上的系外行星、数千万太阳系小天体。

GAIA 将让人类明确银河系的三维结构，了解它的结构和演化。

GAIA 有两台望远镜，由 10 面反射镜奇妙的组合在一起，一台接受天体的光经 M1、M2、M3、M4、M5、M6 反射到达焦面；另一台接受与天体呈 106°.5 的背景光经 M1′、M2′、M3′、M4′、M5、M6 也反射到达焦面。两路光的光程相同，汇聚于同一终点，最后两面反射镜也是共同的。第一面主镜是长方形曲面，1.45 米×0.5 米，焦距 35 米，10 面反射镜组装在一具直径 3 米的 6 边形光具座上，工作温度－100℃（光盘图 7.5.27 GAIA 光路图）。

GAIA 计划 2000 年启动，将于 2011 年 12 月在法属圭亚那库鲁（Kourou）航天中心由俄罗斯联盟-ST 火箭发射，起飞重量 2 030 千克，送入距地球 150 万千米的 L2 点上。在西班牙和澳大利亚分别有两台直径 35 米的地面站天线，负责与 GAIA 传送指令和数据。计划投资 4.5 亿欧元，约合欧盟每人 1 欧元（光盘图 7.5.28 GAIA 轨道示意图）。中间是太阳，内圆是地球轨道，外圆是 GAIA 轨道，椭圆是近地小行星群的轨道，斜线区域表示 GAIA 正对太阳方向不能观测（光盘图 7.5.29 GAIA 外貌图）。巨大的多边形是遮阳伞，同时也是太阳能电池（光盘图 7.5.30 GAIA 的中心设备结构；光盘图 7.5.31 GAIA 的观测和研究对象）。

7.5.13 欧洲的地面大光学望远镜计划

1. 口径 100 米光学望远镜

口径 100 米光学望远镜（OWL）取意于“our wonderful logo”或“over whelmingly large”（无与伦比之大）。OWL 是欧盟的一项雄伟的计划：建造口径 100 米的地面光学望远镜（光盘图 7.5.32 100 米光学望远镜 OWL 设想图之一；光盘图 7.5.33 100 米光学望远镜 OWL 设想图之二）。

OWL 将工作在光学和红外波段（0.32～12 微米），光学视场＞30 角秒，红外视场＞2 角分。可观测仰角 30°以上星空。计划投资 10 亿欧元。但放置地点还没选好。或许考虑智利欧南台附近，大西洋加纳利群岛中的 La Palma 岛欧北台，或许考虑阿根廷乃至南极洲。

2. 口径 42 米光学望远镜

2004 年 12 月开始，一批欧洲的天文学家提出建设 30～60 米大望远镜的设想。2005 年 10 月发表的《OWL 蓝皮书》认为 100 米的 OWL 望远镜不够现实，进而提出口径 42 米的 E-ELT（European Extremely Large Telescope）望远镜计划。E-ELT 的主镜面由 906 块对角线长 1.45 米的 6 边形镜片组成，椭圆抛物面型，卡塞格林系统，中间留有直径 4.8 米的通光孔，采用有 5 000 个调整点的主动

光学系统。(光盘图 7.5.34 E-ELT 望远镜设想图)望远镜可动部分总重 5 500 吨。预计 2010 年实施，2017 年建成，总投资 5～10 亿欧元(光盘图 7.5.35 E-ELT 外景设想图)。

3. 口径 50 米光学望远镜

2003 年 8 月，瑞典隆德(Lund)大学发表长 372 页的口径 50 米光学望远镜(Ero50)研究报告，提出建造口径 50 米大望远镜的计划。建议芬兰、爱尔兰、西班牙、瑞典、英国合作，望远镜主镜面由 618 块直径 2 米的 6 边形镜片组成，采用有 3 169 个调整点的主动光学系统(光盘图 7.5.36 Ero50 望远镜与波音 747 大小比较图)。望远镜可动部分总重 3 500 吨。工作波段 0.35～28 微米，最高分辨率 2～3 微角秒，极限星等 37.7 等。预计 10 年建成，放置地点可考虑智利北部或拉帕尔马岛，总投资 5.94 亿欧元(光盘图 7.5.37 Ero50 外景设想图)。

7.5.14 欧洲的赫歇尔望远镜和普朗克望远镜

赫歇尔望远镜(Herschel)的全称是 the ESA's Herschel space observatory，为纪念英国天文学家兄妹威廉·赫歇尔和卡罗琳·赫歇尔而命名。这是一台前所未有的远红外至亚毫米波空间望远镜(曾被称为 far infrared and sub-millimetre telescope，FIRST)，望远镜口径 3.5 米，工作波段 60～670 微米已于 2009 年 5 月 14 日世界时 13 时发射，发射重量 3.4 吨，工作地点为距地球 150 万千米的 L2 点。主要任务是探测宇宙 5～50 开低温区域的物质分布，研究星系合成、宇宙的早期演化，恒星诞生与星际物质的关系，星际分子，彗星、行星和卫星的大气及表面情况(光盘图 7.5.38 赫歇尔望远镜设计图)。

与 Herschel 同时发射的还有普朗克望远镜(Planck)，它是欧空局第一台宇宙微波背景辐射望远镜，口径 1.5 米，重 1.9 吨，带有两个微波探测器：LFI，频率 30～70 吉赫兹；HFI，频率 100～857 吉赫兹。将在灵敏度、分辨率和工作波段方面超过以往发射的探测器。Planck 以德国物理学家普朗克命名，工作位置也在 L2 点上，而且与 Herschel 一箭双星，由阿丽亚娜-5 火箭发射，然后分离在各自的位置上(光盘图 7.5.39 普朗克望远镜设计图)。

7.5.15 口径 16 米空间望远镜

口径 16 米空间望远镜(advanced technology large aperture space telescope，ATLAS)美国巴尔的摩空间望远镜研究所的两位天文学家提出设计方案，建造口径 16 米的空间望远镜，也发射到拉格朗日 L2 点上(光盘图 7.5.40 口径 16 米 ATLAS 空间望远镜设想图)。

7.6 中国的现代天文望远镜计划

我国是天文学发展最早的国家之一，早在战国时代就有了青铜制造的天文仪器——浑仪，到了东汉张衡的时代，浑仪已发展得相当完备，能测量天体的地平、赤道和黄道坐标。元代天文学家郭守敬制造的简仪，除了没有望远镜光学系统以外，其机械系统和观测方式已经和现代的水平仪、赤道仪相当。现在南京紫金山天文台仍保存有明朝制造的浑仪和简仪，以既是天文仪器又是青铜艺术品的双重身份为公众展出。这两件仪器原属北京古观象台，1900 年八国联军入侵北京时，浑仪被德国侵略军抢走，陈列于波茨坦皇家花园内，1921 年根据凡尔赛和约归还我国；简仪被法国侵略军抢至法国使馆，未及运走即迫于舆论归还。"九·一八"事变后，为避免日本侵略战祸，于 1933 年运到南京，陈列于紫金山天文台至今。

西方天文望远镜发明之后，中国天文仪器渐显落伍。1949 年之前国内最大的天文望远镜是紫金山天文台从德国进口的，口径 60 厘米。而国内的望远镜制造技术则是一片空白。

1958 年中国科学院成立了南京天文仪器厂（后改名为天文仪器研制中心；2002 年起，中心的科研部分发展成为国家天文台南京天文光学技术研究所）。天文望远镜制造和天文光学技术研究逐渐发展起来。目前，我国自己研制的口径 1 米以上的光学天文望远镜主要有：中国科学院上海天文台佘山观测站的天体测量望远镜，口径 1.56 米；中国科学院北京天文台兴隆观测站的红外望远镜，口径 1.26 米和兴隆观测站的口径 2.16 米望远镜（光盘图 7.6.1　兴隆观测站 2.16 米望远镜）。2.16 米望远镜 1989 年建成，口径在远东地区名列第一，在亚洲居第二位，仅次于印度的 2.34 米望远镜。2.16 米望远镜完成了多项可与西方大型望远镜相媲美的观测任务。仅 1996～1998 年三年间，用 2.16 米望远镜共认证了 26 颗河外超新星和 100 多颗类星体。近年来又在跟踪精度方面有很大提高，实现了自动导星；状态维护非常好，每年安排 400～600 项观测任务，故障时间累计不到一天。2.16 米望远镜的研制和使用，使我国一大批天文仪器专家和实测天体物理学家得到锻炼和成长。

1986 年南京天文仪器厂和北京天文台联合研制成功的多通道太阳望远镜，位于国家天文台北京怀柔观测站，是世界上第一台能同时观测太阳三维磁场和速度场的太阳望远镜（光盘图 7.6.2　怀柔观测站多通道太阳望远镜）。1990 年建成的的口径 13.7 米、毫米波射电望远镜，位于青海省柴达木盆地腹地、德令哈市以东 32 千米的野马滩（光盘图 7.6.3　德令哈天文站的 13.7 米毫米波射电望远镜）。主要用于星际分子辐射的波谱研究，也在世界上有一定的地位。其接收天线购自美国，接收机及其余设备由南京天文仪器厂和紫金山天文台联合研制。

国家天文台北京密云观测站米波综合孔径射电望远镜，由 28 台直径 9 米的天线组成，视场 10°，分辨率 3.8 角分，南京天文仪器厂和北京天文台联合研制，主要用于米波巡天、射电变源和超新星遗迹的研究（光盘图 7.6.4　密云观测站米波综合孔径射电望远镜）。上海天文台佘山观测站和新疆乌鲁木齐天文站的两台口径 25 米的射电望远镜，南京天文仪器厂研制，参加欧洲甚长基线干涉网（EVN）和国际联合的 VLBI 工作，同时开展脉冲星等自主研究工作（光盘图 7.6.5　上海天文台 25 米射电望远镜；光盘图 7.6.6　乌鲁木齐天文站 25 米射电望远镜）。2006 年国防科学技术工业委员会月球探测工程中心建成了位于昆明国家天文台的口径 40 米射电望远镜，和位于密云国家天文台的口径 50 米射电望远镜，投入嫦娥号探月卫星的测控工作（光盘图 7.6.7　昆明观测站 40 米射电望远镜；光盘图 7.6.8　密云观测站 50 米射电望远镜）。

2004 年南京紫金山天文台与南京天文光学技术研究所合作在江苏盱眙观测基地，建成口径 1.0/1.2 米施密特型望远镜，在近地天体的观测能力方面居世界第 5 位（光盘图 4.5.5）。国家天文台云南基地，购自英国的口径 2.4 米光学望远镜正在丽江高美古观测站安装调试之中。

世纪之交，在当代世界大型天文望远镜研制的新浪潮中，中国天文学家独辟蹊径，提出四项具有世界先进水平的跨世纪宏伟计划和探月工程，将使我国天文学研究重新崛起，以崭新的姿态进入 21 世纪。

7.6.1　大天区面积多目标光纤光谱望远镜

大天区面积多目标光纤光谱望远镜（large sky area multi-object fiber spectroscopic telescope，LAMOST）是一架主镜口径为 6 米，有效通光口径为 4 米，焦距 20 米，视场达 20 平方度的地平式反射施密特型望远镜（光盘图 7.6.9　LAMOST 光路图）。这台望远镜克服了大口径反射望远镜视场小，而大视场施密特望远镜口径又不能大的矛盾，在世界上独树一帜。施密特望远镜口径不能大的原因是其改正透镜在材料和制造技术方面的困难。现在世界上最大口径的只有 1.34 米；口径 4 米以上的望远镜视场均小于 1°，限制了对大天区面积的观测。LAMOST 采用了施密特望远镜的光路原理，但其改正透镜改为用反射镜代替，因而可以做得很大。LAMOST 的主镜和改正镜都采用小镜面镶拼工艺。主镜 M_B 为球面，曲率半径 40 米，由 37 块 6 边形小镜面组成，每块直径 1.1 米，厚 75 毫米，总直径长 6.67 米，宽 6.05 米，总面积 29.08 米^2，相当于直径为 6.08 米的圆面积。37 块镜胚从德国购买，在俄罗斯加工制造（光盘图 7.6.10　LAMOST 主镜）。改正镜 M_A 为四次曲面，由 24 块 6 边形小镜面组成，每块直径仍为 1.1 米，厚 25 毫米，总长径 5.72 米，短径 4.4 米，面积 18.86 米^2，相当于直径为 4.36 米的圆面积。24 块镜胚从俄罗斯购买，在南京加工制造（光盘

图 7.6.11 LAMOST 改正镜）。两块镜面都采用主动光学系统。主镜是固定不动的，光轴与水平面向下倾斜 25°，所以它可以采用较厚的玻璃。改正镜采用地平式支架系统，可以绕水平轴和垂直轴双向旋转，其中心点位于球面主镜的球心位置。改正镜的基本面型为平面，工作过程中，用主动光学系统控制其适时变形为所要求的非球面，同时克服在转动过程中产生的重力变形和温度变形。每一单块小镜面既有面型改正，也有适应整体拼装要求的位置改正。整个光学系统的焦面为球面，位于主镜和改正镜之间的中央位置，直径 1.75 米，面积 2.4 米^2，视场 5°。在整个视场范围内设置 4 000 根光导纤维，每根直径 0.3 毫米，可将 4 000 个天体的光学像引导到光谱仪室中的 16 台低分辨率的摄谱仪狭缝中，每台摄谱仪狭缝同时接纳 250 个星像，分光后得到其光谱，再由高灵敏度的 CCD 探测器将得到的光谱信息送入大型计算机处理。摄谱仪最高分辨率为 1～0.25 纳米，测谱范围 370～900 纳米，最长跟踪时间为 1.5 小时，可测量赤纬 −10°～+90° 的天空范围，极限星等 20.5 等。LAMOST 望远镜总投资 2.35 亿人民币，安装在中国科学院国家天文台兴隆观测站。那里，每年平均有 270 个晴夜，可观测时间 2 000 小时，累计 3 年可获得 1 000～1 500 万条天体光谱。LAMOST 的建成，将使 21 世纪的中国光学天文学及天体物理学研究，在大天区范围和大样本数量方面居世界领先水平。2007 年 5 月 28 日 LAMOST 已在国家天文台兴隆观测站喜获首条天体光谱，2008 年 6 月 21 日，37 块球面主镜和 24 块改正镜安全、顺利完成拼装，2008 年 10 月 16 日，LAMOST 举行落成典礼（光盘图 7.6.12 LAMOST 观测室外景）。

7.6.2 空间太阳望远镜

空间太阳望远镜（space solar telescope，SST）直径 2 米，长 5 米，主体是一台口径 1 米的光学望远镜和我国特有的二维偏振光谱仪和磁分析器。工作波段 390～660 纳米，共 8 个通道。附带 5 台口径 12 厘米的小望远镜，4 台用于软 X 射线成像，工作波长 12.9～30.4 纳米，分辨率 0.5 角秒；一台用于 H_α 和白光全日面观测，分辨率 1 角秒。另有宽带频谱仪，对 γ 射线（128 通道）、硬 X 射线、软 X 射线（各 64 通道）进行频谱测量（光盘图 7.6.13 SST 的结构示意图）。SST 有效载荷 1.2 吨，发射总重 2 吨，由长征 4 号 B 火箭发射到距地面 730km 的圆形绕极轨道上，与太阳同步运行，尽量不使望远镜落到地球的影子中去。SST 将对太阳表面多层次的精细结构进行不间断的观测研究，最高分辨率 0.1 角秒，相当于太阳表面上 70km 的尺度，揭示太阳活动的准确规律及其物理本质。计划投资 10 亿人民币。

7.6.3 500 米口径球面射电望远镜

500 米口径球面射电望远镜（five hundred meter aperture spherical tele-

scope，FAST）是一架大型固定式射电望远镜，500 米口径的反射面由 1 800 个 15 米直径的六边形球面单元拼合而成。采用与大型光学望远镜主动光学类似的系统，每一个球面单元适时控制拼合成一个瞬时旋转抛物面，有效口径 300 米，能观测地平高度 40°以上的所有天体（美国阿雷西博望远镜因面型不能调节，只能观测地平高度 70°以上天体），工作波段 70 兆赫兹～3 吉赫兹（10 厘米～4 米）。FAST 的有效口径与阿雷西博望远镜相当，但可观测天区范围大得多，灵敏度也提高 3～10 倍。FAST 准备建于中国贵州省平塘县境内（东经 106°.86，北纬 25°.65），那里有许多喀斯特地貌，具有天然球面地形（光盘图 7.6.14　FAST 的建设示意图）。

2007 年 7 月国家已正式批准 FAST 立项，2013 年建成。建成以后除进行天文学研究的深空探测任务之外，还将探测地外文明，或与外星人进行通信联络。在空间科学方面，FAST 能为提高飞行器的深空测控能力，加快深空数据通讯速率，利用脉冲星计时完成精确自主导航任务，诊断识别低至 1 赫兹微弱空间信号等国家战略雷达重大需求服务。还可跟踪探测日冕物质抛射事件，在空间天气预报方面作出贡献。

在 FAST 成功的基础上，将考虑 1 千米^2 面积的 SKA（square-kilometer array）建设。SKA 将是人类建造的最大尺寸射电望远镜，中国提出的一种可能是：建造单台 1 000 米口径，或 30 台口径 200 米的球面天线，进行综合孔径观测。FAST 的建设将对未来的 SKA 建设积累经验。国外的 SKA 计划将在澳大利亚西部或南非建设大规模多天线系统，由超过 3 000 面直径 12 米天线组成（光盘图 7.6.15　SKA 射电望远镜设想之一；光盘图 7.6.16　SKA 射电望远镜设想之二）。

7.6.4　硬 X 射线调制望远镜

硬 X 射线调制望远镜（hard X-ray modulation telescope，HXMT）是我国第一台自主发射和研制的空间天文望远镜，主要工作在硬 X 射线波段 1～250 千电子伏特，进行巡天观测。HXMT 定位精度 1 角分，角分辨率 5 角分。计划于 2011 年发射运行，轨道倾角 43°，高度 550 千米（光盘图 7.6.17　HXMT 的结构示意图）。1993 年提出 HXMT 计划的时候，国际上还没有硬 X 射线波段的巡天观测。然而 9 年后，欧、美、俄联合的 INTGRAL 于 2002 年上天，2004 年美国硬 X 射线卫星 Swift 也上天了。它们正在进行硬 X 射线巡天，中国丧失了一个首先开辟宇宙新窗口的难得机遇。但 HXMT 具有世界最高灵敏度和空间分辨率，拥有中国人自主创新的调制成像技术，而且还具有研究黑洞快速光变的独特能力，仍不失为具有国际先进水平的我国第一台空间天文望远镜。通过在 20～250 千电子伏特硬 X 射线能区，预计能发现上千个被尘埃包裹的超大质量黑洞以

及未知类型的天体，研究黑洞、脉冲星等致密天体的强引力场中的动力学和高能辐射过程。

除以上四项具有世界先进水平的重大项目之外，还有几项有特色的天文探测项目，它们是：

7.6.5 微波阵列望远镜（21CMA）

2004～2005年，国家天文台在新疆乌拉斯台（北纬42°06′东经86°41′）建设的探测宇宙原初结构专用微波阵列望远镜（21 centimeter array，21CMA），是世界上最早投入“宇宙第一缕曙光探测”的专用低频射电望远镜阵列。21CMA由长度分别为2.74+6千米和4.1千米的东西和南北两条基线组成，最高空间分辨率可达2角分。21CMA共有阵列81组，天线10 287面，每面天线均固定在地面上永久指向北极，使天线的指向不受地球转动的影响，始终观测北极天区100平方度的视场，获取微弱信号（光盘图7.6.18　21CMA微波阵列望远镜）。21CMA工作波段为1.5～4.2米（70～200兆赫）。21厘米是中性氢原子的特征谱线。宇宙第一缕曙光的21厘米谱线，因为红移而正好落入1.5～4.2米波段范围（相应的红移量在6～20）。21CMA的工作相当于欧洲的低频微波阵（LOFAR）和澳大利亚的MWA（murchison widefield array）（光盘图7.6.19　中国21CMA微波阵列望远镜工作站）。

国家天文台还争取在我国西部（西藏）的新台址建设口径为30～60米的毫米波/亚毫米波VLBI站，建设我国的毫米波VLBI网。

7.6.6 中国甚长基线干涉网

中国甚长基线干涉网（Chinese VLBI network，CVN）计划在上海建设一台口径65米，工作波长可延伸至7毫米的大型可动式射电望远镜，将来与贵州的FAST、云南的40米、北京的50米以及上海和乌鲁木齐的两台25米射电望远镜组成甚长基线干涉网。65米望远镜已在中国科学院立项，争取2012年建成。

7.6.7 “夸父”计划

以观测研究空间天气的整体连续演化为主要目标的“夸父”计划（KUAFU）由三颗卫星组成：“夸父”A卫星位于距地球150万千米的L1点上，用来监测太阳活动的发生及其伴生现象向日地空间的传播过程；“夸父”B包括两颗卫星，位于地球磁层两极地区，观测地球空间对太阳活动和行星际扰动的响应，持续观测极光及其与磁层亚暴发生和发展的过程。计划2012年发射上天。

7.6.8 中俄联合空间探测计划

（1）利用俄罗斯预期于2009年9月实施的火卫—伏波斯土壤计划（Phobos-

Grunt）发射一颗中方负责的小卫星，与俄方联合开展火星空间环境的探测。主要的科学目标为探测火星的磁层和电离层，探寻火星水的消失机制，开展比较行星学的研究，揭示类地行星空间环境演化的特征及其规律。

我国首个火星探测器取名“萤火一号”，体积 75 厘米×75 厘米×60 厘米，太阳帆板展开近 8 米，质量约 115 千克，携有等离子体探测包、光学成像仪、磁通门磁强计、掩星探测接收机等载荷，预计于 2010 年到达火星，并绕火星运行，设计寿命 2 年。俄罗斯探测器将在火卫一伏波斯上登陆。

（2）中俄合作世界空间紫外天文台计划。世界空间紫外天文台（WSO/UV）是俄罗斯、中国及欧洲共同参与研制的，工作在 103～320 纳米波段的综合性大型空间天文台。望远镜口径 1.7 米，配有高分辨率、高灵敏度照相机、高分辨率阶梯光栅摄谱仪以及中国承担研制的长缝摄谱仪（LSS），其在紫外波段的观测能力是哈勃空间望远镜的 5～10 倍。预计 2010 年底发射，设计寿命 5 年。WSO/UV 将填补未来 5～10 年大型天文观测设备在紫外波段的空缺，为揭示宇宙再电离的历史、宇宙早期结构的形成以及探测太阳系外行星大气等一系列天文学重大前沿问题提供强大的观测手段。

7.6.9　嫦娥号探月工程

中国嫦娥号探月工程分三步进行：第一步，发射“嫦娥一号”探月飞船，在距月面 200 千米的轨道上绕月球两极飞行，每 127 分钟绕月球一圈，飞行一年后，结束探测任务；第二步 2010 年前后，实现在月球上两次软着陆以及月球车和机器人探测月球；第三步 2020 年前后，发射能返回地球的探测器，将月球样品带回中国。

嫦娥一号已于 2007 年 10 月 24 日 18 时 05 分在西昌发射升空（光盘图 7.6.20　嫦娥一号发射升空）。经过 8 次变轨后，于 11 月 7 日正式进入工作轨道，11 月 18 日卫星转为对月定向姿态，11 月 20 日开始传回探测数据，11 月 26 日公布了第一幅月面图像（光盘图 7.6.21　嫦娥一号公布的第一幅月面图像），同时完成了三维影像的制作。

嫦娥一号体重 2 350 千克，体积 200 厘米×172 厘米×220 厘米，起飞重量 250 多吨。总投资 14 亿人民币（光盘图 7.6.22　嫦娥一号）。嫦娥一号的主要任务是：获得全月面的 3 维影像图；分析铀、钍、锝、钛、铬、铁、铝、镁等 14 种矿产资源的分布和含量；测量月壤厚度，估算氦 3 资源的储量；考察距地面 4 万～40 万千米的地-月空间环境。飞行过程中需要高精度的保持设计轨道和准确无误的实时变轨；探月过程中，探测器镜头要对准月球，太阳能电池板要对准太阳，传送信号的天线要对准地球。测控系统以我国 S 频段航天测控网（地面测控中心和地面站分布在西昌、北京、西安、喀什、青岛、厦门）为主，辅以国家天

文台设在上海、昆明、乌鲁木齐和北京密云的4台射电望远镜甚长基线干涉测量系统（VLBI），两艘位于太平洋中的“远望号”航天测量船以及欧洲空间局设在智利、圭亚那、澳大利亚和西班牙加纳利群岛上的4个测控站。

2009年3月1日15时36分，嫦娥一号卫星开始减速，16时13分10秒成功撞击在月球的丰富海区域。撞击点位于月球东经52.36°、南纬1.50°，为我国探月一期工程画上了圆满的句号。嫦娥一号在轨运行一年中，共传回1.37TB的有效科学探测数据，获取了全月球影像图、月表部分化学元素分布等科学研究成果，圆满实现工程目标和科学目标，为我国月球探测后续工程和深空探测奠定了坚实的基础。

欧洲空间局于2003年9月27日发射智能1号绕月飞船，2006年9月3日成功撞击月面。2007年9月14日，日本发射“辉夜姬（Kaguya）”号绕月飞船，由一艘主探测器和两个被命名为“翁”和“妪”的子探测器组成，飞行高度距月面100千米。“辉夜姬”已于2009年6月11日北京时间2点25分，成功撞击在月面南纬65.5°、东经80.4°的基尔环形山附近。2008年10月22日，印度发射“月船一号”绕月探测器，重523千克，轨道高度100千米，计划工作两年。

美国宇航局2009年6月18日（北京时间19日5时32分）将两个探测器——月球勘测轨道飞行器（LRO）、月球坑观测和传感卫星（LCROSS），用一枚“宇宙神-5”运载火箭发射升空。目的是搜寻适宜登月着陆点、探寻月球水冰存在证据和勘测月球资源等，为美国宇航员2020年重返月球奠定基础。这标志着美国“重返月球”计划正式启动。

7.6.10 我国未来大望远镜的选址

世界大望远镜的优选地点：夏威夷孤处太平洋中心，智利北部和加拉利群岛都是西临大洋东靠沙漠，海拔都在2 000～4 000米，大气透明、稳定，成像质量好，晴天数多。中国沿海不具备这些条件。对西部内陆考察的结果，已初步勘选了西藏噶尔（狮泉河）、新疆塔什库尔干和云南丽江等适宜天文观测的地区，为建设大口径的普适型光学望远镜作前期准备。

南极天文选址受到世界瞩目。南极内陆居地球上独特的地理位置，有最好的大气透明度和大气视宁度（望远镜成像质量的一个指标），3～4个月的“永夜”可连续进行天文观测，较低的风速以及能通透较宽电磁波段等条件都对天文观测十分有利。南极陆地面积1 400万千米^2，是中国国土面积的1.5倍，而且不属于任何国家，没有土著居民。南极沿海狂风暴雪、气候恶劣，但内陆地区却稳定平和、风速极低。南极内陆中心地区虽然严寒，但没有频繁的昼夜交替温度变化，没有陆地沙尘和城市污染的影响，没有飞行航班造成的纵横交错的水汽凝结云。那里的一些高地（Dome，译为冰穹）是大望远镜观测的理想地点。2005年，法

国和意大利建成冰穹 C（Dome C）站，海拔 3 260 米，澳大利亚天文学家在那里安放了远程控制望远镜，冬季的观测结果表明，大气视宁度优于其他地方（夏威夷和智利北部视宁度 0.7 角秒，而 Dome C 只有 0.27 角秒）。澳大利亚、法国、意大利计划于 2010 年在那里安放一台 2.4 米大视场光学/红外望远镜（pathfinder for an international large optic telescope，PILOT）。澳大利亚、美国等国还建议在 2014 年在那里安放一台口径 8.2 米的偏轴光学/红外望远镜（large antarctic plateau clear aperture telescope，LAPCAT）。2007 年，美国在其南极点的 Amundsen-Scott 南极站（海拔 2 850 米）建成了 10 米口径的亚毫米波望远镜（south pole telescope，SPT）。

南极内陆的最高峰冰穹 A（Dome A），位于南纬 80 度 22 分 00 秒，东经 77 度 21 分 11 秒，海拔 4 093 米（光盘图 7.6.23　南极冰穹 A 地图）。中国第 21 次南极考察队的张胜凯、武汉大学博士生，是人类首次登临冰穹 A 的第一人，时间是 2005 年 1 月 18 日北京时间下午 3 时（光盘图 7.6.24　人类首次登临冰穹 A）。至此，南极的四个极点已全部为人类征服：地理极（美国）；磁极（法国）；温度最低点（苏联）；海拔最高点（中国）。2008 年 1 月 12 日，两位天文学家（紫金山天文台朱镇熹和国家天文台周旭）随中国第 24 次南极考察队二次登临冰穹 A，现场安装了南极望远镜阵中国之星（CSTAR），采集选址信息（光盘图 7.6.25　中国天文学家首次登临冰穹 A）。它由 4 台口径 14.5 厘米的望远镜组成，对南极天顶 20 多平方度内的所有天体自动监测，远程传回数据，南京天文光学仪器研究所研制。预计冰穹 A 将有比冰穹 C 更好的天文观测条件。我国政府已正式批准在冰穹 A 建立继长城、中山之后的第三个南极科考站——南极昆仑科考站。我国正在研制 3 台 50/75 厘米施密特望远镜，将于 2009 年安装在冰穹 A 进行天文选址观测。

7.6.11　我国未来大望远镜工程计划

（1）计划研制 1 台放在南极冰穹 A 的口径 4 米光学/红外望远镜（2 度视场，极限星等 29 等）。

（2）考虑在南极建设 LAMOST 型、口径更大的望远镜。

（3）在青藏高原或南极建设口径 30 米的亚毫米波射电望远镜，采用主动光学系统和超导接收机技术。使我国亚毫米波天文观测走到国际前沿。

（4）在青藏高原建造口径 12～16 米的大视场光学望远镜，与 30～50 米的光学/红外望远镜互补和配合。

（5）建造口径 30～50 米极大光学/红外望远镜，使我国的天文学全面走到国际前沿，重现古代中国天文学的辉煌。

第 8 章　20 世纪 60 年代天文学四大发现

现代天体物理学的进展就像最奇妙的科学幻想小说一样令人销魂夺魄。

——约翰·奥杜则

我在这儿搞一项新技术来拿博士学位，可一帮傻乎乎的小绿人却选择了我的天线和我的频率来同我们通信。

——乔丝琳·贝尔

20 世纪 60 年代是人类科学技术突飞猛进的时代。经过第二次世界大战后 10 多年的休整，各国医治好战争的创伤，将许多原来用于军事的资源、技术与人才转为用于发展经济建设和科学研究。以无线电装备与技术为手段的射电天文学尤其得到长足的发展。射电望远镜所提供的宇宙景象与我们在光学望远镜中看到的俨然不同。人类有了新的能力来考察原先不可见的宇宙，获得了预想不到的效果。20 世纪 60 年代天文学四大发现：脉冲星、类星体、3 开微波背景辐射和星际有机分子，都是以天体的射电观测为先导作出的。其中三项都获得了诺贝尔物理学奖。类星体的发现虽然没有获诺贝尔奖，但天文学家们普遍认为，发现类星体的深远意义、类星体的研究价值与另外三项相比，是有过之而无不及的。

8.1　脉　冲　星

脉冲星的发现并不是发现者本来研究的目的，而是“射电源闪烁”课题研究中意想不到的副产品。

英国剑桥大学的休伊什（A. Hewish）和他的博士研究生乔丝琳·贝尔(J. Bell，即后来的 Burnell 夫人，现任英国开放大学物理系主任，IAU 提案委员会委员）一起设计了一架很大的微波射电望远镜，由 2 000 多个单元组成的天线，占地面积 2 公顷，目的是研究由地球大气电离层、太阳系行星际电离气体及银河系星际电离气体引起的宇宙射电源的闪烁效应。我们都熟知，恒星有闪烁现象而行星却没有，原因是行星有一定的视面积，而恒星只是一个点。射电源的闪烁也如此；面积较大的射电星系是不闪烁的，只有角直径非常小的射电源才会闪烁。研究射电源闪烁的仪器要求有灵敏度很高的短时响应能力和快速重复观测功能，这正好构成了发现脉冲星必需的条件。

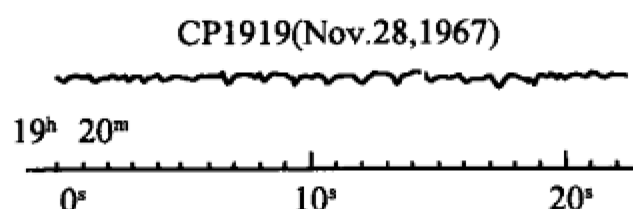


图 8.1.1　最早收到的脉冲星信号

1967 年 7 月仪器开始在波长 3.7 米，频率 81.5 兆赫兹处工作，担任观测的贝尔当时只有 24 岁，她从每天长达 30 米的记录纸带中，敏锐地发现一种奇妙的时有时无的射电脉冲信号，周期只有 1.337 秒（图 8.1.1），不像是地面的电机或摩托车之类的干扰，便及时报告了她的导师。11 月份，他们用一台时间响应更快的接收机，在天空的 4 个不同位置发现了类似的脉冲信号。当时英国正流行一本有关外星人的科幻小说，所描写的外星人身材矮小，皮肤是绿色的。严肃的剑桥科学家不无幽默地或者有所希冀地把他们的发现命名为 LGM-1，2，3，4（小绿人 1 号，2 号，3 号，4 号），正像本章开头引用的乔丝琳·贝尔所写出的那样。经过冷静而慎重的思考，他们认为这不是外星人发来的联络信号，而是来自一种遥远的特殊天体——脉冲星（Pulsar）。

1968 年 2 月 24 日，他们在英国《自然》杂志上发表了题为"一个快速脉冲射电源的观测"的文章，报道了贝尔最早发现的脉冲星并取名为 CP1919，同时十分敏锐地指出，这种脉冲星可能就是中子星。

中子星的概念是理论物理学家 20 世纪 30 年代提出的。早在卡文迪许实验室的英国物理学家查德威克（J. Chadwick）发现中子（1932 年）后不久，苏联物理学家朗道（Д. Ландау）即首先提出，在极高温度和压力的情况下，质子和电子有可能都结合成中子，同时发射中微子而生成一种密度极高的稳定态物质，其主要成分是由中子构成的。由这种物质组成的恒星就是中子星。1934 年，两位在美国工作的天体物理学家德国人巴德（W. Baade）和瑞士人兹威基（F. Zwicky）发表文章指出，在超新星爆发以后，可能残留下一个核心，符合朗道提出的条件而被压缩成中子星。1939 年，著名的美国物理学家、第二次世界大战中"曼哈顿计划"（即原子弹研制计划）的首席科学家奥本海默（J. R. Oppenheimer）等建立了第一个中子星理论模型。以上理论当时在天文界并没有引起足够的重视，这种体积小密度高的天体没有人注意在天空中去搜寻它。

1968 年，剑桥大学可能已经发现中子星的消息迅速传遍世界。拥有 76 米口径射电望远镜的英国焦德雷尔斑克天文台在两个星期之内就发表了他们对 CP1919 的仔细观察结果。4 个月内，至少有 8 个天文台参与了对脉冲星的观测。理论天体物理学家也纷纷将他们的注意力集中到这方面来。至 1968 年底，全世界共发现脉冲星 23 颗，发表有关论文 100 多篇。对脉冲星的命名也统一规定为 PSR 后面加注赤经和赤纬位置数据。如 CP1919 命名为 PSR1919+21（PSR 是脉冲星 Pulsar 的缩写，1919 指赤经 19 时 19 分，+21 指赤纬+21°），其脉冲周期已准确测量到 1.337 301 192 2 秒。澳大利亚的拉奇（M. I. Large）等发现了周期只有 88 毫秒的船帆座脉冲星，美国的斯蒂尔林（D. H. Staerlin）发现了蟹状

星云中有两颗脉冲星。后来经过阿雷西博天文台口径 305 米射电望远镜的认证，其中一颗 PSR0525＋21 年龄在 10 万年以上，与蟹状星云没有关系，另一颗 PSR0531＋21 与蟹状星云同龄，是真正的蟹状星云脉冲星，它的脉冲周期准确到 0.033 097 565 054 19 秒。光盘图 8.1.2 是哈勃、钱德拉、斯必泽三大空间望远镜联合拍摄的蟹状星云照片，2006 年 10 月 25 日释放。星云中央的小白点就是脉冲星，质量与太阳相当，直径约 19 千米（光盘图 8.1.2　蟹状星云中的脉冲星）。

1968 年 6 月，美国康乃尔大学的戈尔德（T. Gold）在《自然》杂志上发表文章，明确指出人们发现的脉冲星是快速自转的中子星。

恒星有脉冲信号发射，通常可以解释为双星系统的绕转或恒星体积胀缩的径向脉动。双星绕转的周期不可能短到如此程度；恒星的径向脉动，即使是白矮星的径向脉动也不可能快到 1 秒钟发生几十次。中子星被自身的引力强烈压缩，体积极小，密度极大。一颗有两倍太阳质量的中子星，半径只有 10～15 千米，密度高达 10 亿吨/厘米^3。图 8.1.3 给出了太阳、白矮星和中子星的大小对比。如果大黑圆是太阳，小黑点就是白矮星；如果大黑圆是白矮星，中子星只有小黑点的十分之一。



图 8.1.3　白矮星、中子星的大小对比

把比例尺缩小一亿倍，太阳是直径 14 米的大球，白矮星的直径缩为十几厘米，中子星的直径只有 0.1 毫米。在角动量守恒的原则下，旋转物体的半径越小，转速越快。花样滑冰运动员在做旋转动作时，如果突然蜷缩起身体，转速必然加快就是这个道理。中子星在半径急遽压缩的情况下，原有的自转速度必然急遽加快，形成极高的旋转速度。另外，原有的恒星磁场在体积压缩的时候，通过恒星表面的磁力线总数没有变化，从而使小了几十亿倍的中子星表面磁力线高度密集，形成达 1 亿特斯拉的特强磁场。太阳和地球表面的磁场均不足 10^{-4} 特斯拉，在物理实验里人工得到的最强磁场是 30 特斯拉，是由重量超过 10 吨的巨型电磁铁产生的。中子星如此强大的磁场在高速旋转的同时会发出一种特殊的辐射，称为同步加速辐射。这种辐射不同于普通的热辐射，其能量不是均匀地分布在各个方向，而是集中成射束状定向辐射。当射束的定向与自转轴不能完全重合的时候，随着中子星的自转，射束便轮流扫过周围的空间，称为“灯塔效应”。向两个方向喷射的光柱，飞快地旋转着，像是在茫茫宇宙中快速扫描的星海灯塔。如果地球处在射束扫过的区域，就会收到间断的脉冲辐射，这就是脉冲星信号。显然脉冲周期等于中子星的自转周期（光盘图 8.1.4　脉冲星模型）。中子星也有可能带有吸积盘（光盘图 8.1.5　带有吸积盘的中子星模型），凭借它强大的引力吸引着周围物质围绕它高速旋转。快速自转的中子星会因为能量损耗使转速降低，经仔细地观测，果然发现脉冲星的脉冲周期在缓慢减短，速率是每秒

10^{-12}～10^{-19}秒。蟹状星云脉冲星的脉冲周期每月约减少 1 微秒。进一步可以推断，由于转速减慢，脉冲周期短的脉冲星一定比周期长的要年轻。蟹状星云脉冲星是 1054 年超新星爆发时产生的，它的年龄很轻，所以转速很快，脉冲周期只有 33 毫秒；而 PSR1919＋21 脉冲周期为 1.34 秒，所以年龄比较老。

1974 年诺贝尔物理学奖授予脉冲星的发现者休伊什，但另一位同样是脉冲星的发现者，当时 24 岁的女博士生乔丝琳 · 贝尔却不在获奖者之列。

中子星的自转周期不能短于 1 毫秒，否则它会因为承受不了自转离心力而破碎。脉冲星是快速自转的中子星，但中子星不一定都有脉冲信号辐射。年龄超过几百万年的中子星，会因转速太慢而停止辐射。1982 年发现了一颗每秒自转 600 次的脉冲星 PSR1937＋21，脉冲周期为 1.5 毫秒，是已知转速最快的脉冲星。截至 2003 年底，银河系中的脉冲星已发现 1 400 多颗，其中毫秒级脉冲星 9 颗。在这些脉冲星中，与总共约 200 个超新星遗迹（类似蟹状星云那样的星云）对得上号的只有 13 颗。其原因可能是有些超新星的残骸不是中子星而是黑洞或根本没有留下任何致密天体；或者是在爆发中形成的中子星被推到了别处，不在残留的星云遗迹中。再有一种原因是，中子星的寿命比超新星遗迹星云的寿命要长得多，即使是只占中子星寿命中有限的一段的脉冲星，依然有可能在许多遗迹星云已经完全消散的地方被观测到。地球上观测到的脉冲星只是所有脉冲星中很少的一部分。如果地球不在脉冲灯塔效应扫射的范围之内，在地球附近就不可能观测到脉冲星。实际存在着的中子星要比观测到的脉冲星数量多得多。据估计，银河系里中子星的总数可能有数万颗。

除了射电脉冲以外，后来又发现了光学脉冲星、X 射线脉冲星和 γ 射线脉冲星。蟹状星云中的脉冲星是在射电、光学、X 射线和 γ 射线各个波段都有脉冲辐射的中子星。它的平均光学亮度相当于视星等为 16.5 等的普通恒星。但是要凭借普通的测光方法（照相或光电）发现它的脉冲特性是不可能的，因为普通测光得到的是长时间曝光的累积效果，脉冲特性都被淹没了。1969 年，三位发现蟹状星云光学脉冲的美国天文学家库克（W. J. Cocke）、迪斯尼（M. J. Disney）和泰勒（D. J. Taylor）使用的是一台用计算机控制的“快速光度计”，安装在亚利桑那州斯提瓦尔德天文台 90 厘米口径的望远镜上。他们将望远镜对准蟹状星云射电脉冲星的位置守候了 4 个夜晚，不是天气不好就是技术故障，都没有观测成功。正当他们扫兴地准备下山的时候，接到电话通知：下一位望远镜使用者因为夫人生病，让他们继续观测两个晚上。这意外的“赏赐”又重新鼓起他们的勇气，检查了全部准备工作，纠正了一处不该犯的错误，等到晚上 9 点多钟，观测终于成功了。消息传出，国际天文学联合会随即发表了特别快报：“1969 年 1 月 15/16 日用光学方法发现了蟹状星云脉冲星的光学脉冲，脉宽 4 毫秒，周期 33.085 毫秒。”3 天之后，麦克唐纳天文台和基特峰天文台也测到了同样的结果。

半个月以后，里克天文台用 3 米望远镜拍到了蟹状星云光学脉冲星的频闪照片（光盘图 8.1.6　蟹状星云脉冲星的频闪照片）。

有的脉冲星是双星中的成员，这样的例子至 2005 年已发现约 100 个，大多数是一个中子星和一个白矮星的组合。两个都是中子星的有 6 对。最重要的一对是 1974 年发现的 PSR1913＋16，位于天鹰座，距离地球 1.7 万光年。其中一颗是中子星，脉冲周期 59 毫秒，质量 $1.4M_{\odot}$；另一颗伴星也是具有同样质量的中子星，但不发脉冲信号。两者相距几百万千米，以 7 小时 45 分的周期绕转，速度达到 300 千米/秒。根据广义相对论，两个强引力场的高速绕转，将有引力波辐射把双星的能量慢慢带走，使整个双星系统的能量变小，绕转周期逐渐缩短，两星距离逐渐靠近。两位美国天文学家泰勒（J. H. Taylor）和赫尔斯（R. A. Hulse）对 PSR1913＋16 追踪观测了 12 年，发现它们的轨道周期 $T=0.322\,997\,462$ 天，每年减小 76 微秒，变化率为 -2.422×10^{-12}。这一数据与根据广义相对论计算出的理论值 -2.6×10^{-12} 相当吻合。预计在未来大约 3 亿年后，两颗中子星将撞在一起，产生最后的引力爆发。泰勒和赫尔斯的工作，提供了广义相对论关于引力波存在的一个证据，因而获得 1993 年诺贝尔物理学奖。赫尔斯是泰勒的研究生，1974 年他们发现 PSR1913＋16 时的年龄，分别是 24 岁和 33 岁。

20 世纪 80 年代以来还发现 32 颗在球状星团中的脉冲星。1999 年开始发现河外星系中的脉冲星，位于大麦云中的 PSR0540-69，旋转周期 1/20 秒，年龄约 1 000 年，周围的亮壳直径约 5 光年（光盘图 8.1.7　大麦云中的脉冲星 PSR0540-69）。另一个周围有亮壳的超新星遗迹 G21.5-0.9，位于盾牌座，距离 1.6 万光年，其中有一颗脉冲星 PSRJ1833-1034。早期的射电观测没有发现亮壳，后来的 X 射线观测发现了。光盘图 8.1.8 是 2005 年 4 月 19 日钱德拉望远镜释放的照片（光盘图 8.1.8　超新星遗迹 G21.5-0.9）。中国天文学家汪珍如等 2006 年发表文章，认为 G21.5-0.9 是中国汉朝的历史文献中记载的，公元前 48 年一颗“客星”的遗迹。

美国《科学》杂志评选 2004 年十大科技成果之一，是新发现一对有完整价值的双脉冲星。说“完整价值”是指过去虽然发现了几对双中子星，但只能收到一颗星的脉冲信号，而这次是能收到两颗星的脉冲信号之首例。使人们更加完整地了解各种物理信息。这对新脉冲星名为 PSRJ0737-3039A/B，位于大犬座，距离 1 600～2 000 光年，是澳大利亚帕克斯天文台 64 米射电望远镜发现的。两颗星的质量分别是 1.337 和 1.251 太阳质量，脉冲周期 23 毫秒和 2.8 秒，相距仅 100 多万千米，绕转周期 2.4 小时，比 1993 年获诺贝尔奖的那一对更有条件准确地验证爱因斯坦的引力波理论（光盘图 8.1.9　双脉冲星 PSRJ0737-3039A/B 示意图）。

早在贝尔和休伊什发现脉冲星之前，英国焦德雷尔斑克天文台 76 米口径的射电望远镜已经记录到几颗脉冲星的信号，有的还相当清晰，只是没有引起重视，都被当作偶然的干扰信号而放过去了。历史告诉我们，敏锐性和勤奋执着的追求是科学发现不可缺少的素质，而“机遇只属于有准备的大脑”（A. B. 诺贝尔）。休伊什因发现脉冲星而获得了 1974 年诺贝尔物理奖。在曼彻斯特（R. N. Manchester）和泰勒合写的专著《脉冲星》的扉页上写道：“献给乔丝琳·贝尔。没有她的聪明和百折不挠，我们就分享不到研究脉冲星的幸运”（光盘图 8.1.10　发现脉冲星时（左）和担任 IAU 提案委员会委员（右）的乔丝琳·贝尔）。

8.2　类　星　体

类星体是一种光学像和恒星类似但又不是普通恒星的一类特殊天体，英文名称是 qusi-stellar object，简称 QSO。类星体最早是作为射电发射源而发现的，曾被称为类星射电源，简称 Quasar。其特征可以概括为：大红移、远距离、高能量、小尺度。类星体是宇宙中最明亮的天体，形成于宇宙的极早期，因而是非常古老的天体；但又因为距离非常遥远，我们看到的只是它很久以前年轻时的相貌，故而又是宇宙中非常年轻的天体。

类星体一经发现就以其非常怪异的性质成为震惊天文界的谜一样的天体。30 多年来，天文学家们从观测上和理论上对之进行了大量的研究工作。有关类星体的物理本质虽然仍存在一些疑难问题，但类星体之谜已基本上得到了化解。类星体的发现与深入研究，使人们对宇宙结构和演化的基本理论提升到一个新的高度。

8.2.1　发现

1959 年，剑桥大学发表了第 3 版射电源表，列有 471 个已观测到的射电源，名为 3C 表。其中一部分成员是银河系中的天体，如 3C144 是著名的蟹状星云 M1；另一些是河外星系，如 3C274 是椭圆星系 M87，3C405 是射电星系天鹅座 A。当天文学家们试图用光学望远镜去逐一辨认其余那些射电源对应的天体是什么的时候，类星体逐渐崭露头角，呈现在人们面前，成为 20 世纪 60 年代的重大发现之一。

当时的射电望远镜技术，定位精度远低于光学望远镜，也没有获得光谱的能力。1960 年，美国天文学家桑德奇等用 5 米望远镜找到了 3C48 的光学对应体是三角座中一颗 16 等的蓝星，并且拍下了它的光谱。起初人们以为这是一颗银河系中的普通恒星，从它那儿发射出较强的射电波。但是它的光谱很特别，有许多

发射线，而且谁也认不出那是什么元素的发射线，紫外辐射也比普通恒星强得多。1962 年，英国天文学家哈扎德（C. Hazard）在澳洲新南威尔士帕克斯天文台，通过 64 米射电望远镜和另一台光学望远镜，利用射电源 3C273 被月球遮掩（月球遮掩其后面的星体，天文学上称之为月掩星）的机会，准确地测定了它的位置。当射电信突然消失的时候，一颗发光的蓝星恰好被月亮掩食，这就是 3C273 的光学对应体，亮度 12.5 等。这颗星的光谱中同样有许多不认识的宽发射线。1963 年，年轻的荷兰天文学家施密特（M. Schmidt）用美国的 5 米望远镜重拍了 3C273 的神秘光谱。经过整整六个星期的研究与思考，施密特终于揭开了关于未知元素的谜团：原来这些特别的光谱线都是已知元素的谱线，只是红移很大，所有谱线都改变了位置，变得使人难以分辨，并不是化学组成有什么特别的不同。3C273 的红移量为 0.158，一条众所熟知的氢元素 H_β 谱线，从 λ＝486.1 纳米，红移到了 λ＝486.1 纳米×1.158＝562.9 纳米（图 8.2.1）。原来在绿色区的谱线竟移到了橙红色区，难怪不为人所识了。只要把红移量改正过来，所有的谱线都一一归位，3C273 的光谱就再没有其他怪异之处，人们的迷惑得以消除。受 3C273 的启发，格林斯坦（J. Greenstem）重新审视了 3C48 的光谱，发现其红移量更大：z＝0.367。时隔不久，至 1964 年底，又认证出 8 颗类似的大红移天体，其中 3C147 的红移量竟高达 z＝0.545。本书 6.3 节介绍过按相对论计算视向速度和用哈勃关系计算距离的公式。以上发现的这些大红移天体，它们的退行速度和距离值可以计算为（取哈勃常数 H_0＝71）：

	红移量	退行速度 /（万千米 / 秒）	距离 / 亿光年
3C273	0.158	4.4	20
3C48	0.367	9.1	42
3C147	0.545	12.3	56

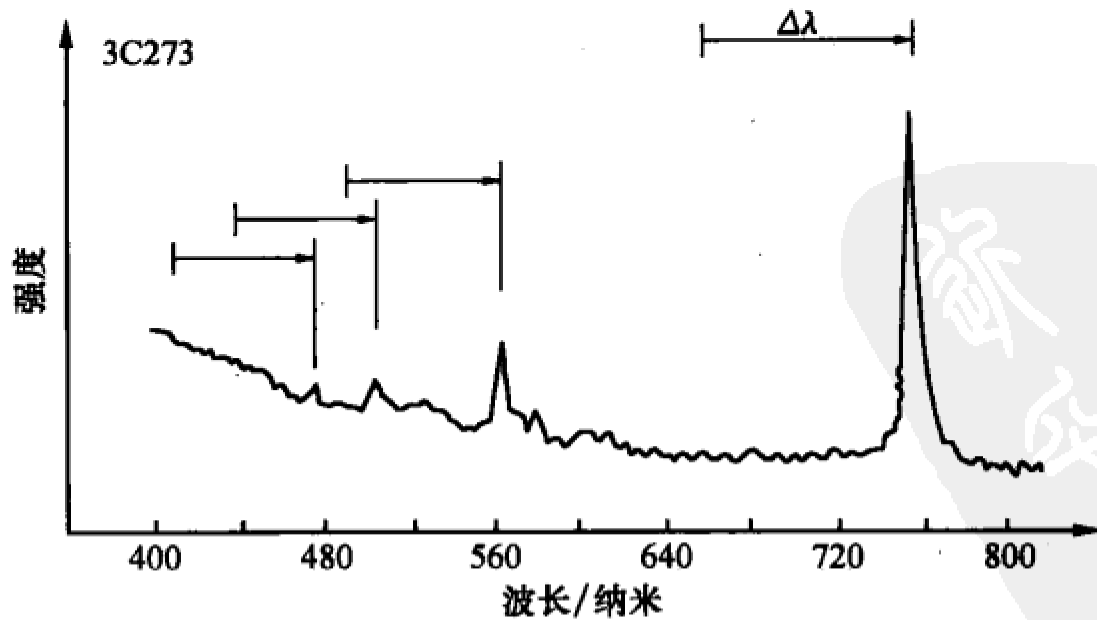


图 8.2.1 3C273 的谱线位移

根据距离值，再从其视星等可以计算其绝对星等，从而得到光度。结果发现，这些天体的光度大得惊人。如 3C273 的视星等 $m=12^{m}.5$，绝对星等 $M=m+5-5\lg D$，将 $D=20$ 亿光年化为秒差距 $D=6.5\times10^{8}$ 秒差距，算出 $M=-26.6$，由太阳的绝对星等 4.79，按公式 $L=10^{\frac{2}{5}(M_{\odot}-M)}$ 计算，得 $L=4\times10^{12}$。3C273 的辐射总功率是太阳的 4 万亿倍。已知太阳的辐射总功率 $L_{\odot}=3.8\times10^{26}$ 瓦，3C273 的辐射总功率竟高达 $4\times10^{12}\times L_{\odot}=1.5\times10^{39}$ 瓦，超过银河系总辐射功率的 200 倍。如此明亮的天体，在这个距离上，如果是星系，在望远镜中应当有一定的面积，并能分辨其细节，而它看上去只像一颗恒星，不具有星系那样大的尺度，惊人巨大的能量密集在一个尺度很小的空间区域里，这种谜一样的天体取名为类星体。

类星体的小尺度还有一个观测上的证据。20 世纪 60 年代中期，一些天文学家翻箱倒柜地查看一堆堆老天文底片，看看是否有一些新近认证的类星体过去早已被无意中拍摄下来。人们果然找到了一些这样的底片。比较不同年代拍摄的类星体照片，发现他们的亮度有以几年几月甚至几日为周期的变化。有些变化相当激烈，达到爆发的程度。例如，3C279 曾在 1936 年和 1937 年爆发过两次，爆发时的亮度比平时增加 25 倍，相当于 1 万个仙女座星系的总亮度。观测到的天体的亮度变化周期是对天体尺度的一个限制。如果天体的尺度是 1 光年，那么这一端的辐射传递到另一端的时间需要一年，整个天体的辐射变化周期凡小于一年的都要搅混在一起，不可能在远处被观测到。因此天体的尺度不可能超过显现出的亮度变化周期内辐射传播的距离。根据这一原理，类星体的尺度不会超过几光年，几“光月”甚至几“光日”，比普通星系的尺度小得多，甚至比太阳系大不了多少。

类星体的距离达几十亿光年，说明光从那里传到地球上需要几十亿年的时间，因此我们看到的是几十亿年前它们的模样。它们诞生的年代一定至少在几十亿年之前。现代天文学发现了一批红移量更大的类星体，最远的竟有 130 亿光年（取哈勃常数 $H_0=71$），如果数据可靠，它一定是 130 亿年之前就已存在的天体。那么，宇宙自身的年龄想必比这段岁月更加苍老。宇宙到底是多少年以前诞生的？类星体的研究直逼这一人们十分关注的问题。当然，从红移量及哈勃关系推算类星体距离，用所得的光年数估计出的类星体年龄不会超过用哈勃常数的倒数来表示的宇宙年龄，因为二者都是依赖于哈勃常数的取值。因此，不能相互验证所取哈勃常数值是否真实。

8.2.2　类星体的空间分布

据 1994 年《欧南天文台科学报告》发表的类星体和活动星系表，截至 1991 年已发现的类星体数目为 6 225 颗，至 2000 年增加到 13 214 颗，2003 年增加到

48 921 颗。这些都是正式编入“类星体和活动星系核表”（2003 年第 11 版）中的。估计至 2008 年已发现的类星体在 10 万颗以上。我们知道，恒星以及星系的成团现象普遍存在。很多恒星成双成对，还有聚星、疏散星团或球状星团；星系也组成规模不一的星系群、星系团、超星系团。类星体是在宇宙诞生后不久形成的天体。类星体的分布代表着宇宙在那个阶段物质分布的情况。类星体是否成团的问题，由于研究工作的困难，统计样本的完备性受到限制，至今还未得出明确的结论。一般认为红移量 z 在 2 以下的类星体表现出明显的成团性，而 $z>2$ 的类星体成团性表现得比较弱。红移更大的类星体似乎是均匀分布的。这与宇宙物质分布均匀的程度随宇宙年龄的增大而逐渐减小的趋势是吻合的。红移越大的类星体，距离越遥远，形成的年代越早，越代表早期宇宙的情况。有些研究工作认为，在 $z\approx2$ 的距离上，可能存在范围很大的“类星体超团”，它们的尺度可能大到 2 000 万秒差距。奥尔特等还发现了 12 对“双类星体”，每对之间的距离为 1 万秒差距，彼此的红移量非常接近。位于智利托洛洛（Tololo）的泛美天文台还发现一个被称为“Tololo 团”的类星体超团，空间尺度在 1 亿秒差距左右，这可能是目前所发现的宇宙中仅次于宇宙“长城”的又一个巨大的天体集团。

早期发现的类星体如 3C273、3C48、3C147 等，红移量都比较小，随着观测技术的改进，观测到的大红移量类星体越来越多。对所有类星体的分布密度进行分析后发现，在红移量小于 2 的范围内，类星体的分布密度随红移量增加而增大；但在红移量比 2 更大的区域内，又刚好相反，类星体的分布密度渐显稀疏。如果红移量与天体的年龄相对应，上述现象表明，类星体是宇宙早期演化过程中在一个特定阶段上产生的。在比 110 亿年前更早的时期，宇宙中的类星体非常少，较多产生的年代是在与红移量 $z=2$ 相应的一段时期，以后又逐渐稀少。至某一年代为止，就不再有新的类星体产生了。

8.2.3 红移有没有极限

红移如果是由多普勒效应引起的，从红移量 z 就可以推算退行速度。在牛顿力学体系中，计算公式为 $v=z\cdot c$，显然 z 不能大于 1，否则 v 将超过光速 c。在 v 较大的情况下，这一简单公式，要换用按相对论推出的公式

$$v=\frac{(z+1)^2-1}{(z+1)^2+1}c$$

这时，z 可以取任意大的值，v 都不会超过 c。类星体的红移量，有没有某种范围限制呢？1973 年旺普列（E. J. Wampler）发现了射电类星体 OQ172，$z=3.53$。这一记录保持了 10 年之久。1982 年奥斯麦（P. S. Osmer）发表文章，认为 3.53 是红移量的极限，不可能再大了。但几乎在同时，女天文学家萨瓦奇（A. Savage）等就在英澳天文台（AAO）发现了一颗视亮度 17.5 等的类星体

PKS2000-330，$z=3.78$，超过了刚刚宣布的“极限”。1987 年又有人找到了 $z=4.01$ 的类星体。接着，施耐德（D. P. Schreider）等用帕洛玛山 5 米望远镜发现了 10 颗 $z>4$ 的类星体，红移量最大的 PC1247＋3406，$z=4.897$。截至 1992 年，已发现 $z>4$ 的类星体有 21 颗，它们的数据列于表 8.2.1 中。这些天体的退行速度都已接近光速，距离都在 127 亿光年以上（取哈勃常数的值 $H_0=71$ 千米/秒·百万秒差距）。世纪末的 2000 年，美国基特峰天文台发现了 $z=5.50$ 的类星体 J030117＋002025。进入 21 世纪，设在阿帕克天文台的美国大学天文联盟国际研究项目 SDSS，发现了 4 个大红移类星体：SDSS1044－0125，六分仪座，$z=5.80$；SDSS0836＋0054，长蛇座，$z=5.82$；SDSS1306＋0356，室女座，$z=5.99$；SDSS1030＋0524，六分仪座，$z=6.28$。光盘图 8.2.2 是这 4 个大红移类星体的照片（光盘图 8.2.2　4 个大红移类星体的照片）：1 为牛顿 XMM 空间 X 射线望远镜所拍：2、3、4 为钱德拉空间 X 射线望远镜所拍。2003 年 10 月 SDSS 又发现 $z=6.4$ 的类星体，这是目前已知的红移量最大的类星体。

表 8.2.1　$z>4$ 的类星体

名　称	红移量	视星等	退行速度/(万千米/秒)	距离/亿光年
PC1247＋3406	4.89	20.4	28.32	130
PC1158＋4635	4.73	20.2	28.23	130
BRI0103＋00	4.44	18.6	28.04	129
BRI0952－01	4.43	18.7	28.03	129
SGP0051－2758	4.43	20.0	28.03	129
BRI1013＋00	4.40	18.8	28.01	128
Q2203＋2915	4.40	20.8	28.01	128
PC0307＋0222	4.37	20.4	27.99	128
BRI0111－28	4.30	18.7	27.94	128
BRI1050－00	4.30	18.6	27.94	128
PC0751＋5623	4.28	19.9	27.92	128
BRI2235－03	4.25	18.2	27.90	128
RRI0151－00	4.20	18.9	27.86	128
PC0104＋0215	4.16	19.7	27.83	128
BRI0035－25	4.15	18.9	27.82	128
Q0000－2619	4.11	17.5	27.79	127
PC2331＋0216	4.09	20.0	27.77	127
BRI0241－01	4.07	18.2	27.75	127
SGP0101－3025	4.07	19.5	27.75	127
PC0910＋5625	4.04	20.8	27.73	127
SGP0046－2919	4.01	19.0	27.70	127

已经说过，用哈勃常数 H_0 计算的宇宙年龄为 $1/H_0$（称为特征膨胀年龄，见 6.3 节），而根据红移量 z 和哈勃常数可以计算类星体的距离

$$D=\frac{v}{H_0}=\frac{c}{H_0}\frac{(z+1)^2-1}{(z+1)^2+1}$$

两者之比为

$$\alpha=\frac{c}{H_0}\frac{(z+1)^2-1}{(z+1)^2+1}\Big/\frac{1}{H_0}=c\frac{(z+1)^2-1}{(z+1)^2+1}$$

若取距离的单位为光年，宇宙年龄的单位为年，则 $c=1$，并且认为，类星体距离的光年数意味着类星体存在年龄的下限，这个比值

$$\alpha=\frac{(z+1)^2-1}{(z+1)^2+1}$$

就等于类星体年龄与宇宙年龄之比，其值与哈勃常数的取值无关。如当 $z=2$ 时，$\alpha=0.8$，即红移量为 2 的类星体形成于宇宙年龄的 20%年代；当 $z=5$ 时，$\alpha=0.946$，即红移量为 5 的类星体早在宇宙年龄的 5.4%年代就已形成。PC1247+3406 的形成年代至少在宇宙年龄的 5.6%时期。新近发现最遥远的类星体红移量是 6.4，$\alpha=0.964$。它的年龄相当于宇宙年龄的 96.4%。说明至少是在宇宙年龄的 3.6%年代之前诞生的。如果宇宙已经 137 亿岁，那么它的年龄至少 132 亿岁，或者说它诞生于宇宙 5 亿岁时。这时的宇宙何以能形成如此大质量、高能量的天体，对于研究宇宙早期演化的历史进程，提出了严重的挑战。

8.2.4 红移量本质之争

类星体之谜的一个关键问题是类星体的红移是否是宇宙学红移（参见 6.3 节）。是宇宙学红移，才能根据多普勒效应计算其退行速度，再用哈勃关系得出其距离，由遥远的距离和视亮度推知它具有特别高的能量以及由距离值估计它生成的年代。在这一系列推理过程中，只有红移量和视亮度是无可争议的直接测定值，其余性质都是由理论推导的结果。如果红移不是宇宙学红移，那么，所有的推导结果就不一定成立了。另一个关键的问题是，对类星体来说，哈勃关系是否成立。如果类星体纵然有那样大的退行速度，但并不遵从哈勃关系，距离也许并不遥远，那么所谓“高能量”和古老年龄也就不是那么回事了。

回溯到 20 世纪 20 年代，哈勃关于造父变星的观测解决了沙普利-柯蒂斯争论，而到现在为止，还没有一种特别有效的方法，不用哈勃关系就能无可争辩地测定类星体的距离，来解决类星体的红移量之争。

大多数天文学家认为类星体红移是宇宙学红移，哈勃关系做为星系的“距离指示器”也同样适用于类星体。若果然如此，剩下的问题就是如何解释小尺度与高能量之间的矛盾了——何以在不比太阳系大多少的体积内，能够产生出上百个星系的光度？

少数天文学家认为类星体不是遥远天体。他们也有一些观测的证据。1987 年，美国海尔天文台的阿尔伯（H. C. Arp）出版了一本书《类星体，红移及其论争》，书中列举了这样的一些证据。其一是天龙座中一个与星系 NGC4319 邻近的类星体“马卡良 205”，从照片上看，有一个明亮的气体桥把两者联系在一起（光盘图 8.2.3 类星体与星系之间的气体桥），如果二者真有物质联系，那么应处于同一距离上，但测量的结果，NGC4319 的红移量 $z=0.006$，而马卡良 205 的红移量 $z=0.07$，相差 11 倍（光盘图 8.2.4 2002 年哈勃望远镜释放的 NGC4319 与马卡良 205 照片）。若果真如此，类星体的红移量作为视向速度和距离的指示器，就不灵验了。当然，也可以认为照片上的“气体桥”只是假象，而各自不同的红移量才真实地表明它们一远一近相差很远的距离，根本没有任何联系。另一些例证是：VV172 的照片显示有 5 个星系均匀地排在一条直线上，像是同一星系团的成员。但其中一个星系的红移量比其他 4 个大得多；塞佛特六合星系是由 6 个亮度大体相同的星系组成的星系群，可其中一个星系的红移量比同伴大四倍以上；斯蒂芬五合星系也有类似的情况；最不可思议的是阿尔伯本人发现的“突出在”NGC1199 的椭圆星系“前面”的类星体（光盘图 8.2.5 NGC1199 椭圆星系），它的红移量居然比 NGC1199 大 5 倍，而它在照片上的“突出感”表现得那么逼真。难道这些都是偶然的假象吗？2001 年阿尔伯和中国科技大学的同行还发表一篇论文，给出星系 Arp220 有一个与之相接的类星体红移量也相差 5 倍（光盘图 8.2.6 与星系 Arp220 相接的类星体）。

大多数天文学家仍然认为，对类星体红移提出质疑的所有例证都是偶然性的“纯粹巧合”。一个反证是，曾有一对所谓双类星体 $1548+114a$ 和 $1548+114b$，红移量相差四倍；后经仔细研究发现两者射电性质不同，表明它们并不是真正的“双类星体”，只不过偶然凑巧在非常接近的方向上，红移量反映的距离差别才是真实的。1978 年夏威夷大学的斯托克顿（A. Stockton）仔细考察了 27 个小红移类星体附近的天区，发现有 8 个类星体的红移量与它们周围聚集的很暗的星系红移量相同，表明这些类星体是“嵌在”它们的背景星系团之中的，类星体也和星系一样服从哈勃关系是很显然的了。

8.2.5 类星体到底是什么

类星体是从射电辐射发现的，但射电辐射恰恰是类星体能量输出方式中最不重要的一部分。1965 年桑德奇就发现了一种射电宁静类星体，除了不发射电辐射以外，其他特征都与类星体相同。以后类星体被发现的数目越来越多，其能量输出方式遍及从射电波到 γ 射线的所有辐射波段。具有强射电辐射的类星体只占总数的 5%，有 90% 的类星体不发射电辐射。1978 年上天的爱因斯坦 X 射线探测卫星在 2 年之内就发现了 200 多颗类星体是强 X 射线源。

经过30多年的观测研究，天文学家们终于揭开了类星体之谜：它们是遥远的活动星系的亮核。我们看到的类星体不是一类天体的全貌而只是其核心特别亮的部分。因为太过遥远，核区以外的暗弱部分难以看到而已。最早的观测是1981年11月，拍到了3C48周围的暗云及其光谱，红移量与3C48一致，后来被认定为3C48所在的基底星系。20世纪90年代以后，哈勃空间望远镜拍到了3C273结构的照片（光盘图8.2.7　3C273的结构），右图是左图中间部分的放大；后来又拍到3C273喷流的照片（光盘图8.2.8　3C273的喷流）。哈勃空间望远镜观测的所有类星体，其中75%有基底星系，其余25%也许不是没有而是尚未观测到。美国综合孔径射电望远镜VLA拍下的类星体3C66B具有与射电星系类似的双瓣，但其距离53亿光年，比一般的射电星系远得多，也明亮得多。类星体3C175也有类似的情况，它位于小犬座，距离77亿光年。类星体3C215位于巨蟹座，距离36亿光年，喷流受阻而扭曲变形。类星体GB1508+5714位于天龙座，距离120亿光年，光盘图8.2.9左上角是钱德拉望远镜拍摄的照片（光盘图8.2.9　类星体GB1508+5714的喷流），喷流有10万光年之长，大图是其结构示意图。类星体3C279位于室女座，距离60亿光年，VLA在1991～1998年，连续拍摄它的喷流，7年居然延伸了25光年，每年流动3.5光年，比光速还要快（光盘图8.2.10　类星体3C279的喷流似超光速），其实这是一种似超光速现象，并不是真正超过光速。在双鱼座100亿光年远处还发现一对双类星体Q2345+007A、B，二者位置接近，红移量也相同。武仙座类星体4C38.41，距离100亿光年，除了有喷流之外，还发出很强的γ射线辐射。

曾经以为类星体的大红移标志着它们是宇宙中最遥远的因而也是距离现在最古老的天体，这种看法也已逐渐被否定了。虽然红移量略大于6的类星体已被发现，但红移量更大的天体却被认定为星系而不是类星体。一般星系的红移量都小于1，但1997年新安装在哈勃空间望远镜上的近红外照相机与多天体摄谱议NICMOS在大熊座天区发现了一批红移量在5～7的星系。1998年，10米口径的凯克Ⅱ望远镜发现了一个名为0140+326RDI的星系，红移量5.34。1999年发现了z=6.68的星系。2007～2008年，还通过引力透镜效应，发现了一些更高红移的星系，红移量在8.5至10.4之间（详见10.8节和12.6节）。

类星体虽然是由射电观测而发现的，但类星体的辐射并不只限于射电波段，而是遍及光学、X射线及γ射线所有波段；不仅有喷流，还隐藏着巨型黑洞。与其他类型的活动星系核相比，类星体也许只剩下唯一的特殊之点就是光度特别大。有的天文学家甚至干脆把绝对星等亮于－24等的活动星系核定义为类星体。这样一来，类星体作为各种活动星系核构成的链条中最亮的一环，此外就不再有什么绝对的特殊之处了。

人们把现代天体物理学与考古学相比拟。考古学家通过发掘出的古人类遗存

来考察人类的历史。遗存所在的年代越早，越能说明人类早期的情况。天文学家探寻的目标不在地下深处，而在遥远的空间中。天文学家通过观测星空来探索宇宙的历史。天体的距离越遥远，所观测到的越是宇宙早期的景象。因为在几十亿光年远处的天体，要经过几十亿年的时间，才能把它们的电磁波辐射传送到我们地球上。古人类学家根据北京猿人、南非古猿的一个头盖骨、几枚牙齿判断出他们是否是人类的祖先以及何者更为远古；天文学家有理由认为那些更遥远的天体是较近天体的祖先。或许蝎虎座 BL 天体正是由类星体演化而来，然后循着演化的阶梯，经过漫长的时间长河，演化成塞佛特星系、爆发星系、射电星系以及像银河系这样的正常星系。一些研究结果表明，类星体的演化可能有两条途径：类星体—蝎虎座 BL 天体—椭圆星系；类星体—塞佛特星系—旋涡星系（光盘图 8.2.11　类星体的演化途径）。

类星体似乎是星系演化的历史过程中一个特殊阶段的行为表现（详见 10.6 节）。与那些红移量更大的星系相比，它还不算古老，但也毕竟是几十或 100 多亿年前的产物，遥远的距离造成我们看到的是它们当年年轻时的面貌。它们从一个侧面反映了早期宇宙的历史面目，因此它们在宇宙研究中有重要的意义。不仅如此，类星体作为最明亮的天体，还成为非常遥远的宇宙深处的照明灯。在它的光芒照耀下，一些本无法看到的暗淡星系或不发光的星系际气体云由于吸收了类星体的光而使我们能够观测到。所以类星体也是研究星系际介质和中介星系的有力工具。

在宇宙演化的历史长河中，比星系更古老的宇宙遗迹是微波背景辐射，诞生于宇宙 30 万～70 万岁时；比之更古老的宇宙文物该是氦原子核的丰度，它代表着宇宙创生刚刚 3 分 46 秒时的印迹；至于重子与光子的比率则更为古老，那是宇宙创生 10^{-36} 秒时的遗存（详见第 12 章）。

8.3　3 开宇宙背景辐射

1964 年，美国贝尔研究室的两位无线电工程师彭齐亚斯（A. A. Penzias）和威尔逊（R. W. Wilson）在贝尔研究室的霍姆代尔基地，用一种特殊设计的喇叭形天线获得了有划时代意义的重大发现——在天空各处无所不在地存在着一种微波波段的辐射，无论哪个方向强度都均匀一致，相当于绝对温度 3 开（3 开≈－270℃）的背景噪声水平对射电天线所产生的辐射，称为 3 开微波背景辐射。这一发现作为大爆炸宇宙创生理论的实测证据，对人类认识宇宙的历史作出了重大贡献，因而获得 1978 年诺贝尔物理学奖。彭齐亚斯和威尔逊虽然在到贝尔实验室之前也曾从事过射电天文的研究工作，但这一次的重大发现却完全出乎他们的意料。

贝尔研究室的喇叭形天线，造型独特（光盘图 8.3.1　发现背景辐射的喇叭形天线），原先设计的目的是用于“回声一号”通信卫星的信号接收，有很强的方向性。当它朝向天空时，地面环境的射电干扰对它的影响很小，因此非常有利于测量来自天空某个方向由各种原因造成的噪声。无线电工程技术里所说的噪声是指，在通信、广播、电视的接收系统中影响正常信号传送的各种无规则干扰信号。这些干扰信号往往既来自大气层和地面环境，也来自接收设备电路本身，是由电路材料中自由电子的无规则热运动造成的。一般来说，电路温度越高，电子热运动越强烈，产生的噪声也就越大。在温度与噪声之间有一定的对应关系。因此，在无线电工程技术领域，常常对噪声水平用绝对温度数据给出。比如，当地面环境温度 27℃（300 开）时，一般的射电天文望远镜中会出现 20～30 开的噪声水平；而贝尔研究室的喇叭形天线由于性能优越，受地面干扰的可能性很小，只造成 0.3 开的噪声水平。

为了更好地消除地面噪声的影响，彭齐亚斯和威尔逊把接收器放在用液氦冷却的环境里，保持温度在 4 开以下。当他们把天线朝向天空时，记录到 6.7 开噪声水平的辐射。扣除大气吸收、天线阻抗损耗及残余地面噪声的影响之后，最后有 3.5 开的噪声水平确实是来自大气外的宇宙背景辐射。在将近一年的观测中，他们曾仔细检查天线金属板的每一处接缝，经常清扫可能成为噪声源的灰尘、鸟粪等污染物，但就是摆脱不掉这 3.5 开的背景噪声。在天空各个方向，在不同的季节，在各种温度和天气条件下，无论白天还是夜晚，始终存在着这一噪声水平的辐射。这是什么原因？这是来自何处的辐射？他们不得其解。

彭齐亚斯有一次在电话中同麻省理工学院的朋友谈起此事。这位朋友说他知道普林斯顿大学一篇科学论文的预印本，讨论的正是这个问题。于是，彭齐亚斯和威尔逊立即同论文作者之一迪克（R. H. Dicke）教授联系，并很快进行了互访。双方相见恨晚，一拍即合。普林斯顿大学的天体物理学家们论证存在并准备着手探测的，正是两位无线电工程师已经找到的东西——3 开宇宙背景辐射。

普林斯顿大学的天体物理学家皮布尔斯（P. E. J. Peebles）和迪克等正在深入研究的是关于宇宙创生的大爆炸理论。这一理论是 20 世纪 40 年代由俄裔美国物理学家伽莫夫（G. Gamow，Г. Гамов）与他的研究生阿尔弗（R. A. Alpher）及贝特共同提出来的，之后又经过核物理学家和天体物理学家加以完善（详见第 12 章）。这个理论的要点是：根据哈勃关系，宇宙目前正在膨胀，而在 130 多亿年之前，宇宙是密集在一起的，温度非常高。一次遍及整个宇宙的突发事件，使宇宙不断膨胀、降温，历经 130 多亿年，演化成今天的宇宙。宇宙的最初 30 万年内，由于温度太高，仅有的质子（即氢原子核）和氦原子核还不能与电子结合在一起成为氢、氦原子，或者说由于高能光子的不断轰击，氢、氦原子即使形成，也会立即被击散，更不用说结构更加复杂的其他原子了。这一时期的宇宙，

到处游荡着稠密的自由电子，它们阻止光子有效地传输，辐射不能自由穿行，宇宙处于混沌和黑暗之中。到了第 40 万～70 万年以后，温度降低到光子能量不足以击散由氢、氦原子核与电子自由结合成的氢、氦原子以及其他简单原子，自由电子消失，辐射可以自由穿行，并立即从宇宙各处迸发出来。混沌初开，曙光骤现。这就是最早的宇宙背景辐射，也称为原初辐射。那时宇宙温度是 3 000 开，辐射峰值波长为 1 微米，在红外波段。从那时起到现在，经历了 130 多亿年，宇宙尺度膨胀了 1 000 倍，温度下降了 1 000 倍，宇宙背景辐射的波长也增加了 1 000 倍，峰值波长到了毫米波段（微波），温度为 3 开左右。

迪克等认为，20 世纪 60 年代的射电接收器的灵敏度应当能够接收到这种辐射，并正着手研制相应的仪器设备，而这件事刚好已被彭齐亚斯和威尔逊于无意之中完成了。1965 年第 142 期美国《天体物理杂志》上发表了彭齐亚斯和威尔逊质朴而意义重大的文章“在 4 080 兆赫上额外的天线温度的测量”，同一期上还发表了迪克和皮布尔斯的通讯，对这一发现作出了宇宙学上的解释，题为“宇宙黑体辐射”。在彭齐亚斯和威尔逊的文章末尾，加了一句十分谨慎的注：“在本期同时发表的通讯是这个观察到的额外噪声温度的一个可能的解释。”

《天体物理杂志》的文章引起各国射电天文学家的轰动，人们开始搜寻在更广的波段范围内来自宇宙背景的辐射。彭齐亚斯和威尔逊的测量只集中在 4 080 兆赫即 7.35 厘米波长上。按照理论，宇宙背景辐射有两大特征：一是无所不在，均匀分布于天空各处，没有方向性；另一个是强度分布应当符合黑体辐射的普朗克曲线。因为“整个宇宙”意味着此外再没有别的存在，它对所有能量应全部吸收而不可能有任何能量逃逸到“外界”去，所以整个宇宙的吸收系数为 1，符合绝对黑体的条件（见 5.1.5 小节）。根据维恩位移定律，绝对黑体的辐射强度按普朗克分布随波长不同而大小不同，但有一个强度最大的波长值 λ_{max}，符合公式

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}$$

式中，T 是黑体的绝对温度，b 是维恩常数，其值为 2.898×10^{-3} 米 · 开。

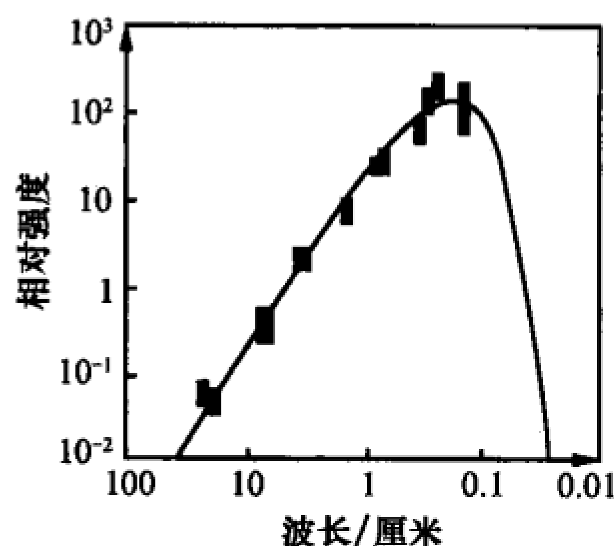


图 8.3.2　对应于 2.7 开的黑体辐射

对于绝对温度为 3 开的绝对黑体，$\lambda_{max} =$ 0.097 厘米，而不是 7.35 厘米。要验证 3 开宇宙背景辐射，必须仔细测量其他波长上的辐射强度，看是否符合普朗克分布。人们测量了 0.5 毫米～30 厘米范围的背景辐射强度，证明强度随波长的变化恰好符合温度为 2.7 开的绝对黑体的普朗克分布曲线（图 8.3.2）。

令人兴奋的结论终于成立了，大爆炸宇宙创生理论得到了一个有力的观测证明。在 1978

年诺贝尔物理学奖的颁奖决定中写道："彭齐亚斯和威尔逊的发现，是一项带有根本意义的发现：它使我们能够获得很久以前在宇宙创生时期所发生的宇宙过程的信息。"

背景辐射的各向同性，表明宇宙膨胀是均匀的，也就是说，在各个方向上膨胀速度是一致的，这与哈勃关系殊途同归。但人们又提出一个问题，我们的地球在宇宙中运动，相对于到处均匀的背景辐射，应当表现出迎面方向的辐射强度略大于背后方向的辐射强度。好像人在垂直下落的雨点中奔跑，前胸一定比后背湿得厉害些一样。在有相对运动的情况下，各个方向的辐射强度，按理论计算，应当符合余弦规律。地球在宇宙中的运动有好多个层次；绕轴自转，绕地月系质心公转，绕太阳公转，随太阳系绕银河系核心公转，以及银河系在本星系群中的运动……一级比一级速度更快，范围更广。到最高一级，也是最大规模的运动是相对于宇宙背景辐射的运动。能否测到因这一运动而导致的背景辐射强度的方向性变化——"宇宙大余弦"？1976年12月开始，美国宇航局和劳伦斯-伯克利实验室的科学家们登上U-2高空侦察机，同时普林斯顿的研究组利用高空气球进行了为期一年的观测，在离地面15千米以上的高空，以前所未有的高精度扫描了大片天区，果然发现了宇宙背景辐射在0.5%的水平上有明显的强度起伏，而且符合"宇宙大余弦"的理论规律（图8.3.3)。这一结果进一步说明，微波背景辐射确实是宇宙大爆炸以后原初辐射的遗迹，而且爆炸导致的宇宙膨胀速度是均匀的。否则背景辐射的强度起伏很难表现出"宇宙大余弦"的效果。

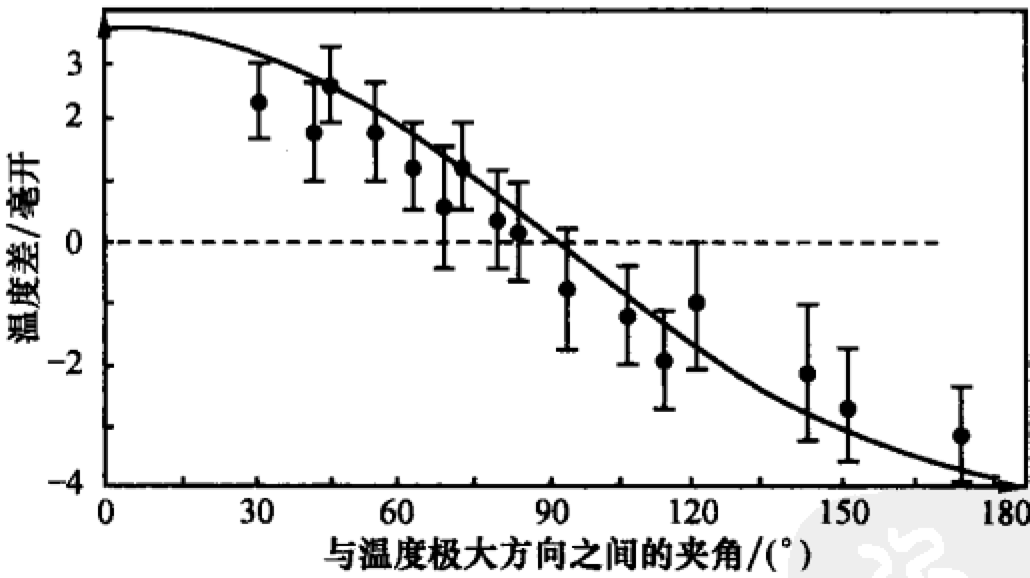


图8.3.3 宇宙大余弦的实测数据

宇宙背景辐射有一部分波长，包括峰值波长，在地面上受大气的屏蔽作用而很难观测到。为了进一步完整精确地进行测量，1989年11月美国宇航局发射了专用的宇宙背景探测卫星COBE（cosmic background explorer)，带有5台主要观测仪器，分别对背景温度、辐射的均匀性和方向性进行4年时间的测量（光盘图8.3.4 宇宙背景探测卫星COBE)。1990年发表的结果表明，宇宙背景辐射

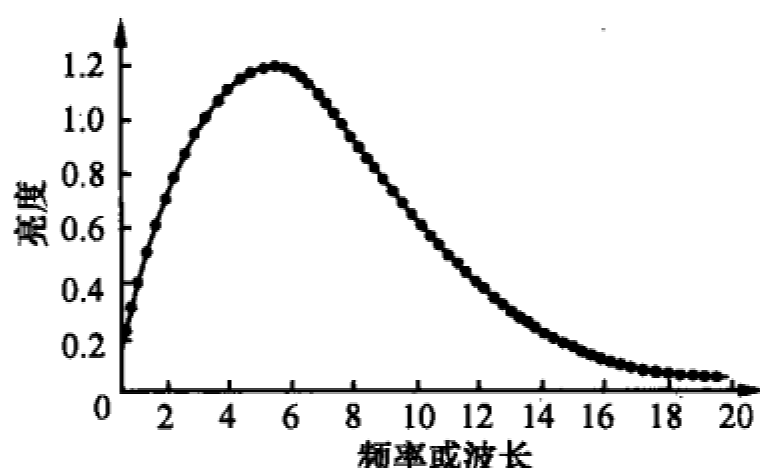


图 8.3.5　COBE 的观测结果

呈现出的是在自然界中很少见到的非常完美的黑体谱（图 8.3.5），温度符合（2.735±0.016）开。1994 年根据更多数据给出的结果是（2.726±0.010）开；1996 年再次提高精度为（2.728±0.004）开。精度之高，从一个侧面令人信服地证明了大爆炸宇宙创生理论的正确性。2006 年，主持该项工作的美国宇航局天文学家马塞（J. Mather）和伯克利大学天文系教授斯穆特（G. Smoot）共同获得诺贝尔物理学奖。获奖证书上写道：他们的工作“发现了宇宙微波背景辐射的黑体形式和各向异性，为有关宇宙起源的大爆炸理论提供了支持。有助于研究早期宇宙，更多地了解恒星和星系的起源。使宇宙学进入了‘精确研究’的时代。”

2001 年 6 月，美国又发射了精度更高、波长范围更广的“宇宙微波辐射各向异性探测器”（WMAP）（光盘图 4.2.4　放置在 L2 点上的 WMAP）。2003 年公布的探测结果成为当年全球十大科技新闻之首（详见 12.8 节）。

8.4　星际有机分子

星际分子是指存在于星际物质（包括各种形态的星云）或星系际物质中的分子。恒星等高温天体都由电离原子组成，不可能有分子存在。在恒星之间或星系之间广袤的空间里，有大量极稀薄的气体和尘埃，称为星际物质或星系际物质。那里的温度比较低，物质形式大多为分子。在星系内部广泛存在着星际物质。银河系中星际物质约占总质量的 1/10。与恒星光学波段的光谱一样，星际物质中的分子也有电磁波辐射，也有相当丰富的谱线，不过它们不在光学波段，而在厘米、毫米、亚毫米、远红外等波长比较长的波段。这些波段的辐射基本上不被星际物质吸收和阻挡，甚至可以从星云深处穿透出来，带给我们宇宙中低温区域的各种信息。对分子光谱的研究无法使用探测原子光谱的一套方法，只有在射电天文方法充分发展的基础上，天文学家才得以进行深入研究，导致“星际有机分子”的重大发现，并列为 20 世纪 60 年代天文学四大发现之一。

早在 20 世纪 30 年代，已经有人从星际物质的光学谱中发现过次甲基（CH）和氰基（CN）的紫外吸收谱线，但限于当时条件未能深入进行研究。20 世纪 50 年代，微波雷达技术用于射电天文观测，1944 年荷兰的范德胡斯特（H. C. Van de Hulst）从理论上算出中性氢原子在能态改变时会辐射出 21.11 厘米波长的电磁波（频率为 1 420.406 兆赫）。中性氢原子由只含一个质子的核和一个核外电

子组成，核外电子绕核旋转，可以处在不同的轨道上。与此相应，原子有不同的能量级别。当电子在最内层轨道旋转时，氢原子能级最低，称为基态。电子除轨道运动外还有自旋，核也有自旋。根据量子力学原理，两者的自旋方向只能平行或反平行。处于基态的原子的能量又因自旋方向平行或反平行而有细微的差别，称为超精细结构。“反平行”是能量最低的状态。星际物质中的中性氢原子由于碰撞，会因吸收能量而从“反平行”变为能量稍高的“平行”状态，当又返回“反平行”时，多余的能量就会变为辐射放出，这就是波长为 21.11 厘米的谱线，简称中性氢 21 厘米谱线。它是氢原子的一条特征谱线，是探索宇宙中中性氢原子分布的重要信息源。星际空间中性氢原子很稀薄，碰撞的机会不多，但由于星际空间广袤无垠，中性氢原子总数很多，因而仍能广泛的发射出 21 厘米谱线。1951 年，来自银河系的 21 厘米谱线首次为美国、荷兰和澳洲的天文学家观测到，开创了射电天文谱线观测的历史。

1949 年，苏联天文学家什克洛夫斯基（И. С. Шкловский）继范德胡斯特之后提出，除了寻找 21 厘米氢原子谱线以外，还可以在某些暗星云中寻找星际羟基（—OH），次甲基（—CH）和氧化硅（SiO）的分子微波谱线。1954 年，在微波波谱学方面有很深造诣的美国物理学家汤斯（C. H. Townes）也把目光转向天文学研究。1957 年，他列出了 17 种可能观测到的星际分子谱线的清单。1963 年 10 月威因雷伯（O. S. Weinreb）和巴瑞特（A. Barrett）首次在仙后座 A 射电源中观测到—OH 的吸收线，这是第一条在射电波长（1 667 兆赫）上发现的天文分子谱线。至 1968 年，汤斯和他的同事观测到星际氨分子（NH_3）和水分子（H_2O）的谱线。1969 年，斯奈德（L. E. Snyder）又观测到星际甲醛（HCHO）的有机分子。到此时，先驱者们艰难探索取得的成就终于激发起人们寻找和研究星际分子的普遍热情，促进了毫米波射电天文技术的快速发展。各种高水平的巨型射电望远镜陆续建成并投入分子天文学的观测，一个认识宇宙的新窗口就此被打开了。分子天文学的开拓者汤斯获得了 1964 年诺贝尔物理学奖。

至 1994 年底，已发现和认证的天文分子总数已达 108 种，至 2006 年 6 月增加到 146 种。此外还有大约 50 种由碳（C）、氧（O）、氢（H）等元素的同位素组成的分子以及大约 50 种已经观测到其谱线发射但尚未认证出的分子。在所发现的天文分子中，既有由两三个原子组成的简单分子，也有像 H_2O、CO 等在地球上常见的分子，还有一大批地球上从未找到天然样品的不稳定分子或所谓“自由基”以及分子离子，有些分子至今尚无合适的命名。

星际分子的组成元素主要有六种，按原子数量排序，它们是：氢（H）、氧（O）、碳（C）、氮（N）、硫（S）、硅（Si）。注意这个排名表中前五位加上磷（P）即所谓“生命元素”，它们是构成地球上各种生物体的最基本元素。地球上的生命元素，前五种在星际空间里也广泛地存在着。这使人们相信，“生命”并

不是地球上特有的现象，它也许广泛分布在宇宙空间的许多角落里。

已发现的星际分子中，大部分是有机分子。其中较复杂的是由 11 个原子组成的 HC_9N 分子（1978 年发现），化学名称是氰基辛四炔，结构式为



1997 年发现由 13 个原子组成的氰基癸五炔 $HC_{11}N$ 的有机分子。2005 年发现 $CH_3OC_2H_5$，2006 年发现 CH_3CONH_2 等分子质量较大的有机分子。几乎所有有机化学领域的基本物质门类：烯、炔、醛、醇、酮、酰胺、酯、醚、腈类分子，在宇宙中都有发现。在人马座的一个星云中，竟然探测到总量比人类有史以来酿造的全部酒精还要多的星际乙醇分子。1973 年以后，用红外观测发现宇宙中有一种广泛存在的未知谱线。根据分析，有理由推测它们可能来自附着于宇宙尘埃表面的多环芳香族碳氢化合物（polycyclic aromatic hydrocarbons），如 $C_{18}H_{12}$、$C_{16}H_{10}$、$C_{24}H_{12}$等。近年来还在晚型星的包层中检测到多种碳链分子，这一动向使 C_{60}的发现者之一，英国化学家克洛托（H. W. Kroto）提出，C_{60}有可能在宇宙中早已存在。C_{60}是化学家在 20 世纪 80 年代用人工制备的一种碳原子晶体，是石墨和金刚石的同素异形体。它由 60 个碳原子形成多面体晶格，表面为 20 个正六边形和 12 个正五边形，样子很像足球，又叫“足球碳”或“布基球”。这种晶体有许多非常奇特而可贵的性质，硬度甚至超过金刚石，是一种非常有前途的人造新材料。克洛托猜想 C_{60}在星云中可能是多种天文有机分子的催化剂（光盘图 8.4.1　已发现的一些星际有机分子举例）。

分子天文学之所以迅速形成天文学的重要分支，一个原因是星际分子的广泛存在。在宇宙中每种分子都有几个或上百个不同的源，它们分布在各种物理条件不同的区域并与各种类型的天体相关联。已发现存在分子的天体有太阳系行星、卫星、彗星、流星体和行星际物质；银河系的核心和旋臂、星云、星际物质、河外星系，星系际空间。1975 年以后，在河外星系中陆续找到水和一氧化碳分子的踪迹。水分子是分子云中一种重要的冷却剂，它对恒星形成区中星云的热动力学过程有重要作用。一氧化碳的谱线在毫米波段，有较高的空间分辨率，分布广泛而稳定。它是研究星云结构、温度及其他特性的强有力的工具。

对星际分子谱线的研究还导致了宇宙中一种重要的自然现象——星际脉泽的发现。脉泽（maser）又称微波受激发射。它和人们已熟知的激光即镭射（laser）在形成机制上是类似的。镭射是原子在光学波段的受激发射，而脉泽是分子在微波波段的受激发射。受激发射的概念是爱因斯坦在 1917 年提出的。当原子处于高能级，会随时跃迁到低能级而发出自发辐射。在未产生自发辐射前，若有一外来光子刺激原子跃迁，就会发出所有特性与外来光子完全一样的光子，这种过程就是受激发射。自发辐射与受激发射虽然都是原子能级跃迁时发生的，光子能量都来自原子内能的减少，但这两个过程发生的条件不同，所发射的光子具

有不同的特性。自发辐射的光子是无规的，受激发射的光子则是全同的。科学家们经过 40 年的努力，终于掌握了人工促使原子在光学波段受激发射的技术——激光技术。激光具有非常良好的方向性、单色性和相干性。现代社会充分享受着各种激光器带来的福利：影视、通信、医疗、计算机等。20 世纪 60 年代，天文学家在遥远的星际空间找到了大自然制作的微波受激发射——硕大无朋的天体脉泽，使分子天文学发展更快。

最早发现的羟基脉泽位于猎户座大星云里。猎户云中有一个正在孕育新恒星的区域，1965 年从中找到一条很强的 1 665 兆赫谱线。如果它是正常的热辐射谱线，从强度估计，发射物质的温度应达到 1 万亿摄氏度，可是羟基在1 000 摄氏度时就会离解而不复存在，所以那是不可能的。根据量子力学的理论计算和实验室观测的结果，—OH 基的正常热辐射谱线频率应在 1 720、1 667、1 665、1 612 兆赫处，强度比例为 1∶9∶5∶1，但猎户云的羟基谱线只有孤立的 1 665 一条，理应比它强近一倍的 1 667 却毫无踪影。这不能解释为正常的热平衡辐射，而是一种新的谱线发射机制——当大量分子物质被激发到高能级状态，又集体返归低能级时，发射强度被强烈放大而产生的微波受激发射，即“脉泽”。产生这种发射的天体称为脉泽源。到 1995 年，在恒星形成区和晚期演化星的包层中已观测到 2 000 多个脉泽源，它们主要是由 OH、H_2O、SiO、CH_3OH 四种物质的微波受激发射构成或引起的。脉泽作为极端的非平衡现象，提供了一种敏感方法，用于研究分子云或恒星的分子包层致密部分中一些特殊物理条件。一些研究成果表明，脉泽是大、中质量恒星正在形成的标志，同时也兼作恒星濒临死亡的指示器。

地外文明长期以来是一个引人入胜的话题。星际分子的发现给宇宙生命起源问题提供了重要的研究线索。不仅地球上的 6 种生命元素，前 5 种在星际空间里也广泛地存在着，地球上所有生命的重要物质成分之一胺基酸，其组成部分也存在于已发现的星际有机分子中。星际和星系际广泛存在着有机分子，当太阳系从原始云中凝聚而成的时候，会不会有一部分星云中的有机分子落在地球上，在长期的演化进程中变成了地球上最初的生命物质？也许正是人类未来对星际分子的研究，揭开了地球和宇宙中的生命起源之谜。

星际有机分子的发现导致分子天文学的诞生，分子天文学的研究成果推动了天体演化及生命演化研究课题的发展，而后者又通过各种方式刺激着分子天文学的深入研究（光盘图 8.4.2 星际有机分子示意图）。

第9章　恒星的能源和演化机制

一切产生出来的东西，都一定要灭亡。

——歌德，《浮士德》

恒星、星团和星系，都在引力收缩中诞生，也在引力收缩中死亡。

——约翰·皮尔·卢米涅，《黑洞》

所有的恒星都终将会像即将燃尽的蜡烛一样暗淡下去，然后一个一个地熄灭。在太空的深处，那些宏伟的天体城邦，那些星系，将满载着多少时代的历史记录缓缓地死去。

——爱德华·哈里森，《宇宙论》

9.1　恒星的能源

9.1.1　爱丁顿的难题

1926年，英国剑桥大学著名的天文学教授爱丁顿出版了一本非常重要的著作《恒星内部结构》。这本书对当时还不清楚的恒星能源问题作了预测性的后来被证明是千真万确的阐述：恒星的能源来自恒星内部的原子核聚变反应，或称热核反应。当时人们还不知道恒星内部原子核反应的具体过程，以及产生这种反应需要何种条件。在那时，物理学家距离用人工方法在实验室里完成热核反应还很远。当时的物理学家认为，在恒星内部，原子核是不可能发生反应的。

太阳是典型的稳定恒星。地球接受来自太阳的能量才得以维持生机勃勃的生态环境。一部分太阳能转化为化学能储存在生物的机体中。活着的生物消耗这部分能量维持生命活动；死后的生物仍然保持着一部分能量，埋藏在地底下数千万年。人类把它们开挖出来取为己用，这就是煤和石油。驱动水电站涡轮机的也是太阳能，因为如果没有太阳蒸发地表的水升上蓝天，化为雨雪，江河早就干涸了。天文学家通过测定太阳常数（现代称为太阳辐照）的方法可以计算太阳辐射的总功率。这个数字大得惊人（见1.2.2小节）。但太阳体内不可能储存无限多的能量，因为它是一个体积和质量都有限的物体。太阳在长时期内以很大的功率辐射出去的那些能量是从哪里来的？在爱丁顿之前已有很多人作过猜测，但都语焉不详，不得要领。如果太阳由烟煤组成，偌大的太阳全部焚烧完毕只需要5 000年。如果太阳能源来自流星体的撞击，为了维持太阳辐射，每年必须有大

约1/100地球质量的流星物质落到太阳上，太阳的质量会逐渐增加，几千年内就会影响到地球的轨道运动，使“一年”的长度缩短，而这不是事实。如果太阳靠自身的引力收缩产能。尽管质量没有消长，不致影响地球的轨道运动，但要维持太阳的辐射，寿命也不会超过 1 000 万年，实际上太阳已存活了几十亿年。以上这些猜测都远不足以解释太阳的能源机制，唯有爱丁顿的热核反应说给人们带来了解决问题的曙光。

爱丁顿为了论证他的学说，还具体计算了太阳内部的温度。太阳是由气体组成的，每一部分气体都要受到聚向中心的引力的作用。如果没有足够的压力与引力相抗衡，太阳就不会维持稳定的结构。根据物理学原理，气体物质的压力取决于它的温度，温度越高压力越大。为了抗衡由巨大质量造成的引力，在太阳内部必须维持强大的压力，温度也必定很高。爱丁顿据此计算出太阳中心区的温度为 4 000 万摄氏度。尽管这一计算结果比现在知道的确切温度大了一倍多，但当时的物理学家仍不以为然。他们认为要想发生热核反应，这个温度还是太低了；除非温度达到几百亿摄氏度，热核反应才有可能发生。爱丁顿无言以对这些物理学家，也说不清到底什么条件才能产生热核反应，但他坚信他的意见是正确的。他执著但又有几分无奈地写道：“我们不和那些认为恒星内部的温度过低，从而不能发生这种过程的批评者们进行争论。我们只是告诉他们，去找个温度高的地方吧。”

9.1.2 原子的内部结构

无论天体和生物，世界上一切物体都是由原子组成的。原子的单一成分称为化学元素，至 1999 年人类已经发现的化学元素有 115 种，其中原子序数数到铀为止的 92 种是在自然界天然存在着的，其余 20 几种只发现于科学家的实验室中，是人工合成的超铀元素。据理论预计，化学元素周期表的终点可能在原子序数为 170～210。因此，至少有 50 多种新化学元素还没有被发现。各种化学元素的原子都是由三种基本物质所组成。它们是质子、中子和电子。质子带正电，中子不带电，电子带负电；质子和中子在原子核里，电子在核外某个绕核运动的轨道上。质子和中子比较重（中子比质子稍稍重一点），称为重子，又因为他们都受原子核内强相互作用力的影响，所以又叫强子；电子质量很轻，仅为质子质量的约 1/2 000，所以又叫轻子。中子只有在原子核内，在强相互作用力的维系下才能长期稳定的存在。在原子核外的自由中子是不稳定的，平均寿命不到 15 分钟（889 秒），超过寿命就会衰变为一个质子和一个电子；原子核内的中子也可以理解为是一个质子和一个电子聚合而成的。

各种元素的原子核都由固定数目的质子和中子组成，而原子核中有多少个质子，它的外部就有多少个电子。这些电子围绕着原子核在某些轨道上运动。电子数和质子数相同，才能使原子整体不带电荷，呈中性。质子数（或电子数）称为

原子序数；原子的质量是由质子数加上中子数的总和决定的，这一和数称为原子的质量数。原子核的实际质量总比组成该原子核的中子和质子的质量总和少一点，这一质量亏损转化为原子核的结合能，在由中子、质子结合成原子核时释放出来。在所有的化学元素中，中等质量的原子核结合能最高，所以在中等质量以下的较轻的原子核聚变为较重的原子核，或在中等质量以上的较重的原子核分裂为较轻的原子核时，都要放出结合能，这就是核能，也叫原子能。元素的化学性质取决于电子组成的原子的壳层。原子序数不同的元素，壳层结构不同，因而化学性质不同。原子序数相同，但核内中子数不同的原子，它们的化学性质相同，但质量数不同，称为同一元素的同位素。

最简单的元素是氢，它由 1 个质子和 1 个电子组成。原子序数是 1，原子的质量数也是 1。居第 2 位的元素是氦，原子序数为 2，质量数为 4。它的原子核内有 2 个质子和 2 个中子，核外有 2 个电子。核内有 1 个质子和 1 个中子，核外有 1 个电子的是氢的同位素——重氢，也叫氘，原子序数也是 1，质量数为 2。组成地球上生物体的重要元素碳，它的原子核由 6 个质子和 6 个中子组成，质量数是 12，核外的电子壳层有 6 个电子绕核运动，它的原子序数是 6。图 9.1.1 为氢、氦原子和碳原子核的示意图。

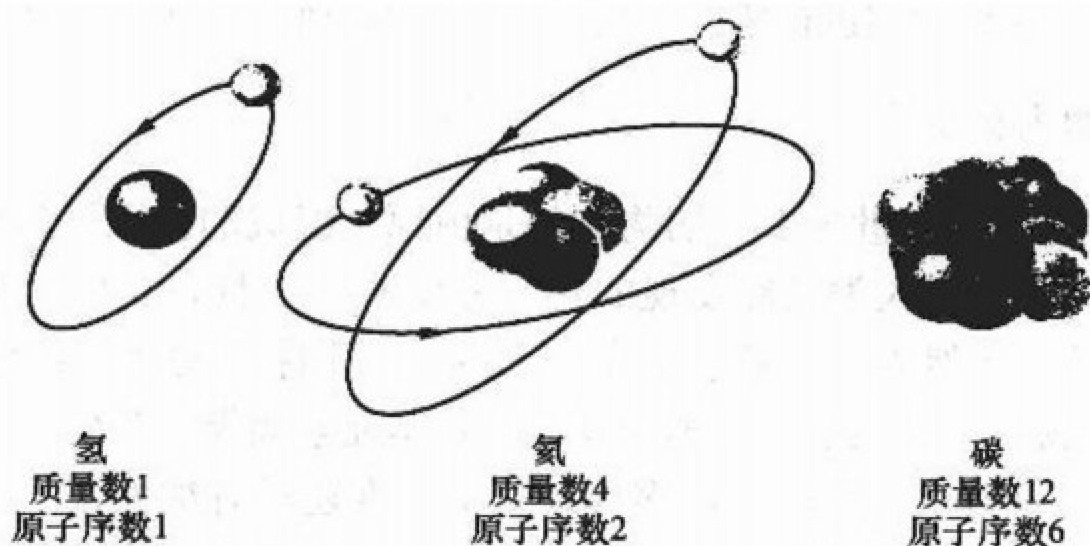


图 9.1.1　氢、氦原子和碳原子核示意图

铁原子的质量数是 56，原子序数是 26。它的原子核中有 30 个中子和 26 个质子，核外各层轨道上运动着 26 个电子。一块铁和一团氢气，物理和化学性质差别很大，但他们都是由质子、中子和电子这些相同的材料组成的。如果人们取 56 个氢原子，将它们的 56 个质子和 56 个电子重新组合，让 30 个质子和 30 个电子组合成 30 个中子，并将这 30 个中子与其余 26 个质子压合到原子核中，让剩下的 26 个电子按某些轨道绕原子核运动，那么人们就由 56 个氢原子“造就”成一个铁原子。实际上这个过程用人工是无法完成的，但是在自然界，在宇宙中，具体说在恒星内部，完成恒星一生演化的实际进程，正是这由氢到铁的元素聚变过程。这一过程表现得十分跌宕起伏，经历几十亿几百亿年的时间，时而激

烈动荡，时而平稳深沉；或有壮烈爆发，或终默默无闻。一部蔚为壮观的恒星演化史，就是这几十种原子聚聚散散、分分合合的演变历史。

9.1.3 夸克、中微子和反物质

作为强子的质子和中子还有一些兄弟，都属于强子家族，它们是介子和超子，品种有 π 介子、κ 介子、Λ 超子、Σ 超子等，总共数百种。它们的寿命都非常短（几亿分之一秒），不能稳定地存在，但在高能加速器实验中可以观察到，在天然存在的宇宙线中也有它们的踪迹。各种强子是由更基本的几种粒子组成的，这些更基本的粒子称为“夸克”。夸克在极短距离和极高温度下，相互之间没有作用，处于自由状态，称为“渐近自由”。温度稍低，夸克就结合成强子；温度一高，强子又破碎为夸克。“夸克”（quark）一词是美国物理学家盖尔曼（M. Gell-mann）1964 年从爱尔兰的一本文学作品中引用的。他因这方面的研究获得过 1969 年诺贝尔物理学奖。当代基本粒子的标准模型认为，基本粒子一共有 12 种，6 种夸克和 6 种轻子：上、下、顶、底、奇、粲夸克；电子、μ 子、τ 子及电子中微子、μ 中微子、τ 中微子。所有的物质均由夸克和轻子组成，它们通过交换不同类型的量子而相互作用，这些量子由规范场来描述。1999 年荷兰霍夫特（G. 'T. Hooft）和维尔特曼（M. J. G. Veltman）获诺贝尔物理学奖的成果，就是为基本粒子的标准模型建立了坚实的数学基础。2004 年美国格罗斯（D. J. Gross）、波利策（H. D. Politzer）和威尔切克（F. Wilczek）获诺贝尔物理学奖的成果，就是通过对规范场的深入研究，为夸克的渐进自由物理图像奠定了理论基础。夸克当初被提出只是理论上的概念；后来，其真实存在逐渐被粒子物理实验所证实。1994 年 4 月 26 日，美国费米国家加速器实验室宣布找到了顶夸克存在的证据，1995 年 3 月被证实。2004 年英国《自然》杂志报道已测出了顶夸克的质量。实验证明，介子是由一对正反夸克构成的，质子和中子是由 3 个夸克构成的。迄今为止，还没发现夸克和轻子还有更深层次的结构。它们是当代人类认识到的最基本的物质粒子。但有两个悬而未决的问题是：为什么从来没有发现过单独存在的夸克？为什么从来没有发现过由 5 个以上夸克组成的物质粒子？2002 年以来，日、美、俄和欧洲的物理学家相继宣布，做出了证明 5 夸克粒子存在的实验，但也遭到另一批物理学家的质疑。结果如何，人们拭目以待。

中微子和电子同属轻子，但质量比电子更轻，甚至认为其静止质量为 0。中微子不带电荷，是呈电中性的基本粒子。它们与其他物质的相互作用极为微弱，穿透力极强，以近乎光速的飞行速度，穿过它遇到的一切物体。

中微子概念是瑞士籍奥地利物理学家泡利（W. Pauli）1930 年提出来的，另一位意大利物理学家费米（E. Fermi）为它取的名字。在当时已经观察到的自由中子衰变为质子和电子的过程中，有一部分丢失的能量下落不明，于是泡利提

出，这丢失的能量可能被一种未能检测到的、很轻的、不带电性的粒子带走，这种粒子就是中微子。所以说中微子概念是为了理论上的需要，为了挽救能量和动量守恒定律而提出来的。

早在 1942 年，中国科学家王淦昌就提出了验证中微子存在的实验方案。1953 年，中微子概念提出后的第 23 年，美国物理学家莱尼斯（F. Reines）等探测到中微子的真实存在，并因此获得 1995 年诺贝尔物理学奖。1962 年，列德曼（L. Lederman）和斯坦伯格（J. Steinberger）开创了用加速器进行中微子实验。他们以 13.5 米厚的美国退役军舰的甲板作靶，观察到中微子的踪迹，并因这项实验的成功而分享了 1988 年诺贝尔物理学奖。1963 年，美国布鲁克海文同步加速器探测到电子中微子和 μ 中微子的存在。1989 年，由设在日内瓦的欧洲核物理研究中心，组织世界各国 372 位科学家合作研究，确定出中微子有 3 个而且只有 3 个品种：电子中微子、μ 中微子和 τ 中微子。1998 年 7 月初，美国费米国家加速器实验室的科学家捕捉到 τ 中微子的踪迹。

在理论上提出中微子概念的时候，认为中微子像光子一样，是没有静质量的。但在以后的基本粒子物理实验中，科学家们遇到一个又一个难以解释的现象；特别是在三种中微子中间出现的“振荡”现象，即 μ 中微子会自动转变为 τ 中微子，电子中微子在行进途中时而处于 τ 中微子状态，时而又恢复为电子中微子状态。如果中微子没有静质量，是不会发生这种振荡现象的。

中微子有无静质量，既是粒子物理学家，也是天文学家和宇宙学家密切关注的问题。它在决定宇宙未来命运方面占据着举足轻重的地位（参见 12.8 节）。1997 年 7 月 29 日，日本东京大学宇宙线研究所所长户冢洋二等在德国汉堡举行的基本粒子理论国际研讨会上发表论文，宣称该所设在岐阜县神冈町的地下 1 000 米深处的中微子探测设备，得到了中微子确有静质量的观测证据。1998 年 6 月 5 日，他们又进一步肯定：有足够的实验证据，证明中微子具有静质量。实验虽未得到确切的中微子静质量数据，但已明确给出了中微子静质量的下限——500 万分之一电子质量。在本书第一版即将付梓的时候，传来中国科学家评选 1998 年世界十大科技新闻的消息，日本发现中微子具有静质量的实验榜上有名。2002 年诺贝尔物理学奖得主，东京大学的小柴昌俊是户冢洋二的老师，他是日本中微子探测试验的开拓者（详见 9.1.5 小节）。

反物质的存在是 1928 年英国物理学家狄拉克从量子力学和相对论直接推导出来的，表现出自然界的对称性。按此理论，一切物质粒子都有各自的反物质：反夸克、反中微子、反电子（也叫正电子）、反中子、反质子。只有光子没有反光子，或者说光子的反粒子就是它自身。光子是纯能量，它的静质量为 0。除光子外，所以粒子都与它的反粒子质量相同，而电荷性质相反，磁矩方向及自旋方向也相反。反电子带正电，反质子带负电。中子和中微子不带电，正反中子和正

反中微子的区别在于自旋方向相反。质子与中子组成原子核，再与核外电子组成原子。与之相对称，反质子与反中子组成反原子核，再与正电子组成反原子。正物质世界里所有的一切，所发生的一切过程，在反物质世界里也都会对称的存在和发生。这奇妙的对称性是相对论和量子力学的一个理论前提。1932 年 8 月 2 日，美国物理学家安德森（C. D. Anderson）从威尔逊云雾室（一种核子研究中的实验装置）中发现宇宙线中的正电子，并因而获得 1936 年诺贝尔物理学奖。1955 年，美国物理学家塞格雷（E. G. Segre）和张伯伦（O. Chamberlain）用人工办法在加速器里发现了反质子，并因此而分享了 1959 年诺贝尔物理学奖。1996 年，欧洲核物理研究中心制造出 9 个反氢原子。但至今还没有发现过宇宙中自然存在的反质子和反中子。

反物质理论告诉我们：正反物质能够在达到一定温度的时候由光子碰撞产生出来，而且是对称的成对产生，这一温度称为阈温；正反粒子如果碰到一起，会发生“湮灭”，又变为光子，正反物质都消灭了，同时以强光的形式放出能量。光子与物质粒子之间的转换当量服从爱因斯坦的质能转换公式

$$E = mc^2$$

按此公式计算，一克反物质如果与一克正物质相遇而“湮灭”，释放出来的能量为 1.8×10^{14} 焦耳，相当于 5 000 万千瓦・时的电能。科学家们乐观地预言，人类一旦掌握了反物质世界的奥秘，就意味着有可能找到比原子核聚变反应强大许多倍的新的产能方式，可是现实宇宙中有没有反物质还是未解之谜。

按宇宙创生的标准大爆炸模型（参见 12.6 节），宇宙早期合成了约占宇宙物质总量 74%的氢原子核和 26%的氦原子核。如果正、反物质是完全对称的，宇宙当中应该存在同样比例的反氢原子核和反氦原子核。反氦原子核由两个反中子和两个反质子组成，质量与氦原子核相同，带负电。1998 年 6 月 3～13 日，由美籍华裔物理学家、诺贝尔奖得主丁肇中教授领导的一个国际科学家小组进行了 AMS 首次升空实验，主要任务是探测太空是否存在反氦原子核。AMS 是阿尔法磁谱仪的简称，首次升空搭载的是“发现号”航天飞机，其主要部件钕铁硼永磁铁是中国科学家设计制造的。等 α 国际空间站建成后，将再次把更加完善的 AMS 送入太空，进行 3～5 年的探测。如果仍未探测到反物质，说明宇宙中真的不存在反物质，或者和反物质世界没有任何交往；如果探测到反物质，则会引发人类对反物质世界强烈的研究兴趣。

9.1.4 质子-质子反应和碳-氮-氧循环

当爱丁顿遇到困难但没有气馁的年代，物理学界本身正遭受着巨大的冲击。德布罗意、波尔、薛定谔、海森伯、狄拉克等一代物理学精英冲破了古典物理学的藩篱，创立了全新的量子力学。新理论认为，氢原子核不一定非要几百亿度的

高温才能发生聚变。在恒星内部，主要成分是氢原子核，也就是质子。一个质子和其他质子之间，因受电磁力的排斥作用而相互分开，就好像当中隔着一座山一样彼此不能交往。但有一种可能性就是无须越过高山，而仅通过某种隧道，使它们得以相遇，产生惊人的聚变反应。对此，物理学中有一个专门的名词叫做“隧道效应”。量子力学认为，温度达到 1 000 多万摄氏度的时候，产生隧道效应的概率虽然很小，但在太阳及其他恒星内部数量如此巨大的原子核集团中，发生足够多的反应次数以维持它们的能量辐射，是完全可能的。

1938 年美国物理学家贝特和德国物理学家魏茨泽克分别发现了发生于恒星内部的两种氢聚变为氦的热核反应。一种称为质子-质子反应，另一种称为碳-氮-氧循环。质子-质子反应过程是这样的：先由 2 个质子（即氢原子核）相碰撞而发生聚变，其中 1 个质子放出 1 个正电子和 1 个中微子后变为中子，与另 1 个质子组成氘（重氢）核，这个氘核又与 1 个氢原子核相撞，聚合为 1 个由 2 个质子、1 个中子组成的氦原子核，同时放出 1 个光子，但因为还缺少 1 个中子，还不是真正的氦核，而是它的同位素$^{3}_{2}$He（He 是氦的化学元素符号，左上的数字 3 是质量数，即质子数与中子数之和；左下的 2 是电荷数，表示它含有 2 个带电的质子)。两个$^{3}_{2}$He 继续相撞，就会聚合成一个由 2 个中子、2 个质子组成的真正的氦原子核$^{4}_{2}$He，同时又放出 1 个光子。多出的 2 个质子（氢原子核）又回到氢原子核的队伍中去。以上过程，总共投入了 4 个氢原子核，产出的是 1 个氦原子核，同时放出 2 个正电子、2 个中微子和 3 个光子。这 3 个光子就是太阳或恒星的辐射能。

碳-氮-氧循环，简称碳循环。投入的也是 4 个氢原子核，产出的也是 1 个氦原子核和 2 个正电子、2 个中微子和 3 个光子。碳只作为催化剂参加反应，但不受损失；氮和氧只是中间过程产物，不影响投入产出。

质子-质子反应和碳循环放出的正电子很快会遇到一个电子又湮灭成光子，而中微子不和任何其他粒子反应，也不被任何物质牵连而改变方向，它从产出地以光速沿着直线飞出去，任何其他物质都挡不住它。当温度足够高时，这两种反应过程都会在恒星内部出现。温度为 1 000 万开时，主要是质子-质子反应。当温度高到已有一些氦原子核进一步聚变为碳原子核，能够提供足够多的催化剂的时候，碳循环成为主要过程。在太阳内部，99%的能源来自质子-质子反应，1%的能源来自碳循环。无论哪一种反应，投入产出的效果都是由 4 个氢原子核聚变为一个氦原子核的反应过程，要损失掉 4×1.007 276－4.001 505＝0.027 599 原子量单位的质量。在 1.2.2 小节中，我们已经计算过，由此质量损耗转换成的能量，正是太阳（或其他恒星）维持辐射所需要的能量。

恒星能源的机制问题终于找到了满意的答案，爱丁顿的说法稳稳地站住了脚跟。贝特获得了 1967 年诺贝尔物理学奖。但诺贝尔奖委员会当时似乎没有调查

过就作出了决定，因而没有把这个奖项也分给德国的魏茨泽克。实际上两位物理学家在这一问题上是分别地但是同样作出贡献的人。

两种热核反应的详细过程如下。

1. *质子-质子反应*

第一步核反应式为



$$^{1}_{1}\mathrm{H}+^{1}_{1}\mathrm{H}\longrightarrow {}^{2}_{1}\mathrm{H}+e^{+}+\nu_{e}$$

H 是氢元素符号，左侧的两个数字，上面一个为质量数（=质子+中子数），下面一个为电荷数（=质子数）。$^{1}_{1}$H 是氢原子核，$^{2}_{1}$H 是重氢原子核（氘核），e^{+} 为正电子，ν_e 为中微子。

第二步核反应式为



$$^{2}_{1}\mathrm{H}+^{1}_{1}\mathrm{H}\longrightarrow {}^{3}_{2}\mathrm{He}+\gamma$$

$^{3}_{2}$H 是由 2 个质子，1 个中子组成的氦同位素核，γ 是光子。

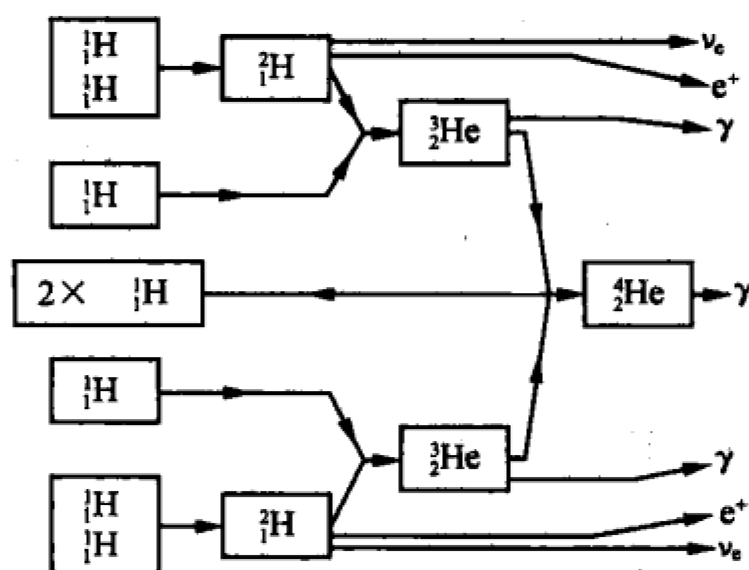
第三步核反应式为



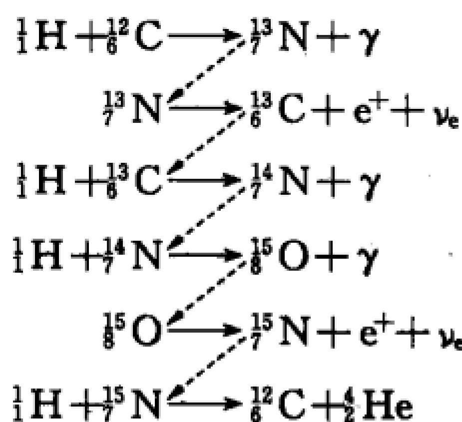
$$^{3}_{2}\mathrm{He}+^{3}_{2}\mathrm{He}\longrightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He}+2\,^{1}_{1}\mathrm{H}+\gamma$$

这三步反应综合进行，总的效果是投入 4 个$^{1}_{1}$H，产出 1 个$^{4}_{2}$He，同时放出 2 个 e^{+}、2 个 ν_e 和 3 个 γ。

综合反应的框图为：



2. *碳-氮-氧（C-N-O）循环核反应式*



$$^{1}_{1}\mathrm{H}+^{12}_{6}\mathrm{C}\longrightarrow {}^{13}_{7}\mathrm{N}+\gamma$$
$$^{13}_{7}\mathrm{N}\longrightarrow {}^{13}_{6}\mathrm{C}+e^{+}+\nu_{e}$$
$$^{1}_{1}\mathrm{H}+^{13}_{6}\mathrm{C}\longrightarrow {}^{14}_{7}\mathrm{N}+\gamma$$
$$^{1}_{1}\mathrm{H}+^{14}_{7}\mathrm{N}\longrightarrow {}^{15}_{8}\mathrm{O}+\gamma$$
$$^{15}_{8}\mathrm{O}\longrightarrow {}^{15}_{7}\mathrm{N}+e^{+}+\nu_{e}$$
$$^{1}_{1}\mathrm{H}+^{15}_{7}\mathrm{N}\longrightarrow {}^{12}_{6}\mathrm{C}+^{4}_{2}\mathrm{He}$$

投入的是 4 个$^{1}_{1}$H，产出的是 1 个$^{4}_{2}$He 和 3 个 γ（光子），2 个 e^{+}（正电子）和 2 个 ν_e（中微子）。由虚线箭头连接的都是中间产物，最后都不存在。$^{12}_{6}$C 作为催化剂，投入多少，还剩多

少，没有损耗。

9.1.5　中微子失踪悬案

在质子与电子结合成为中子时，要放出 1 个中微子；在质子放出 1 个正电子变为中子时，也要放出 1 个中微子。恒星内部的热核反应是按后一种过程放出中微子的。恒星内部放出的中微子数目是光子数的 2/3，总量是很大的。中微子不与其他任何物质发生作用，径直以光速运动。太阳中心区热核反应产生的光子在高温高密的环境中自由程很短，经无数次碰撞、迂回，要经历 1 000 万年才能到达太阳表面。在地球上我们接受到的太阳光子，仅需 8 分钟就由太阳表面传到了地球，但这些光子从太阳中心产生出来的时间是 1 000 万年以前。唯有中微子，是 8 分多钟以前刚刚从太阳中心产出的，唯有它们携带着太阳中心区的最新信息来到我们身边。如果我们有办法连续观察这些中微子，一旦发现中微子数目锐减或停止传送了，表示光子持续供应的时间还能延续 1 000 万年，起到了预警的作用。地球上每一个人体每秒钟都有 1 万亿个太阳中微子穿过，白天从头顶贯穿到脚下，晚上又从脚下贯穿过头顶，而我们却毫无知觉，科学家现在还没有能力截获中微子携带的任何信息。

如果天文学家要造一架特殊的望远镜来观察太阳中微子，白天他把望远镜对准太阳，太阳中微子聚焦成一个亮斑；夜晚他可以把望远镜朝着地下，隔着地球对准太阳，照样可以得到这个亮斑，因为地球对于中微子是透明的。然而这种望远镜不可能制造成功，因为找不到任何材料可以改变中微子的运动路径，使它们折而聚焦。

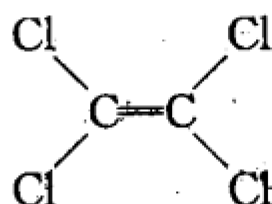
科学家们苦思冥想，终于找到一种探察中微子踪迹的办法。早在 20 世纪 40 年代，意大利裔苏联物理学家蓬德科沃（B. M. Pontecorve）就已提出通过氯元素探测中微子的可能性。氯元素 Cl 由 17 个质子、17 个电子和 18 个中子组成，质量数 35。它的一种同位素 ^{37}Cl，含有 20 个中子。当高能中微子轰击 ^{37}Cl 的时候，有一种概率很小的可能性，使一个中微子暂时性地与 ^{37}Cl 原子核中的 1 个中子发生作用，将中子衰变为 1 个质子加 1 个电子，于是 ^{37}Cl 少了 1 个中子却多了 1 个质子和 1 个电子，变成了 ^{37}Ar，它含有 18 个质子、18 个电子和 19 个中子。其核反应式为



$$^{37}_{17}\mathrm{Cl} + \nu_e \longrightarrow {}^{37}_{18}\mathrm{Ar} + e^-$$

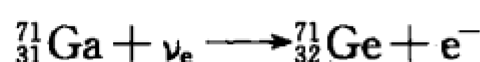
^{37}Ar 不是通常的惰性气体氩原子而是它的同位素。^{37}Ar 具有放射性，不能长期稳定地存在，经过 35 天以后，它又重新变为 ^{37}Cl，并放走中微子。如果在这 35 天之内从 ^{37}Cl 中捕捉到衰变出来的 ^{37}Ar，那么就证明受到过中微子的光顾。由于产生这一过程的可能性概率很小，需要大量的 ^{37}Cl 才有机会捕捉到很少量的 ^{37}Ar。

1967 年，美国布鲁克海文实验室的物理化学家戴维斯（R. Davis），在南达科他州一个深 1 500 米的废金矿井中放置了一个巨大的容器，内装 610 吨四氯乙烯液体。深入地下是为了避免地面上的各种干扰。四氯乙烯是一种工业中用作清洗剂，医学上用作驱肠虫药的氯制剂，与四氯化碳是近亲。四氯化碳的分子式是 CCl_4，四氯乙烯的分子式是 C_2Cl_4，结构式为



在整个容器中有 10^{30} 个氯（Cl）原子，其中 1/4 是 ^{37}Cl。按理论计算，在太阳中微子的轰击下，当产生和衰变达到平衡的时候，应当有 35 个氩原子 ^{37}Ar。当然，要从 610 吨液体中打捞出 35 个氩原子，则比大海捞针还要困难得多，但科学家们还是想出了主意来统计氩原子的数目。据多年的监测和统计，探测到的中微子数目不及太阳中微子理论值的 1/3，那么那 2/3 的中微子到哪里去了呢？是探测技术疏漏，还是对太阳产能机制认识不全面，还是基本粒子理论出了问题？这就是有名的“太阳中微子失踪悬案”。

后来科学家们又找到了另外一种探测中微子的办法，就是利用镓吸收中微子后变为锗的原子核过程，其反应式为



$$^{71}_{31}Ga + \nu_e \longrightarrow ^{71}_{32}Ge + e^-$$

镓探测器比氯探测器灵敏度更高，而且能探测到能量较低的中微子。镓虽然是冶炼铝的副产品，但数量非常稀少，而且是电子工业的重要原料，所以价值贵重。各个国家为了国防上的需要都有镓的储备，但要把其中很大的一部分用于天文探测显然是有困难的。德国的普朗克核物理研究所为建造镓探测器，向德国、美国和以色列用租借的方式获得镓，因为在探测过程中镓并没有损耗，探测结束后可以原物奉还。意大利一项名为 GALLEX 的实验，把含有 30 吨镓的 110 吨氯化镓（$GaCl_3$）溶液放进了阿布鲁斯省格兰萨索山地下 1 200 米深处的矿井中，探测太阳中微子。在俄罗斯高加索，也在进行俄美联合的镓探测器计划，使用 60 吨金属镓进行中微子探测。1987 年，在日本东京以西 300 千米的岐阜县神冈町，一座深 1 000 米的砷矿矿井中，安置了一个装满 2 140 吨纯水的容器，利用太阳中微子穿过时发生微弱闪光的原理，在容器周围安置了 948 支光电倍增管来监测进入容器的中微子。1996 年扩建后，纯水量增加为 5 万吨，光电倍增管增加到 11 200 个。在美国俄亥俄州，一座盐矿的地下深处也有一个类似的 IMB 国家实验室探测器。当然，无论氯探测器还是镓探测器都没有直接截获到中微子，只是探查出中微子曾经光顾过的蛛丝马迹。它们的探测结果依然表明 2/3 的太阳中微子下落不明。而且做过专门实验，用人工方法制造出一批中微子，都能被探测器发现。太阳中微子失踪悬案更加令人费解了。

1987 年 7 月 23 日，当大麦哲伦云中的超新星（见 5.6.3 小节）SN1987A 爆发的时候，日本神冈、美国俄亥俄、意大利和苏联的 4 个中微子探测器都探察到了来自 17 万光年以外的超新星爆发过程中释放出来的中微子曾经光顾的踪迹，它们是从南极穿过地球来到这些探测器的，到达时间早于光学波段信号出现 22 小时。

在发现 e（电子）、τ、μ 三种中微子之间有振荡现象，即一种中微子会突变为另一种中微子之后，人们想到，太阳热核反应中产生的 e 中微子，在飞行途中是否突变为另两种中微子，而造成中微子失踪之谜？1999 年 4 月在加拿大安大略湖畔萨德贝里一座镍矿的地下 2 000 米处，建成了新型的中微子天文台 SNO（光盘图 9.1.2　SNO 中微子天文台地下位置）。直径 12 米的球形容器，储满 1 000 吨重水，放在高 34 米的坑洞内（光盘图 9.1.3　SNO 中微子天文台的装置），周围有 9 600 支光电倍增管，e、τ、μ 三种中微子在此都可以探测到。至 2002 年，由国际上 17 个单位、179 位科学家共同合作，终于探测到已经转换成 τ 和 μ 的那丢失的 2/3 太阳中微子，实测结果与理论值符合得非常好。中微子失踪悬案终于破解，天文学家建立的太阳模型和物理学家关于中微子的理论都被证明是正确的。中微子探测的开拓者，美国戴维斯和日本小柴昌俊获得了 2002 年诺贝尔物理学奖。

神奇的中微子，无论是在实验室里还是在太空中，人类都已观察到它的踪迹。在对核子理论和恒星能源机制问题的研究中，中微子都担负着重要的角色，小小的中微子，还在决定宇宙未来命运的关键问题中占有举足轻重的地位（参见 12.8 节）。

9.2　主序和主序前期

9.2.1　主序星的理论模型

主序阶段是恒星一生所经历的主要阶段。恒星在这个阶段停留的时间占整个寿命的 90%。恒星在主序阶段的特点是在恒星内部进行着氢⟶氦的热核反应。在恒星的每一个局部，由热核反应产生的压力与由质量决定的引力相平衡，恒星的质量、体积、温度和光度都不发生大的变化，各种物理性质都处于平衡状态。不同主序星在光谱型和光度方面表现出的差异完全由它们的质量来决定。我们在夜空中看到的绝大多数恒星都是主序星。

原始恒星主要是由 70%～75%的氢和 24%～27%的氦组成的。这些氢和氦是大爆炸初期布满整个宇宙的原初物质。一旦因某种原因使原初物质相对集中在一起，就形成了原始恒星；当原始恒星内部发生了氢⟶氦的核聚变反应，并达

到了一定的规模，主序阶段就开始了。仅靠氢⟶氦热核反应提供能量的主序星，用现代核物理理论，只要知道其总质量以及氢和氦的比例和重元素（在天体物理领域，将氢和氦以外的所有元素都称为重元素）含量，就可以“计算”出恒星表现出来的各种性质，比如内部各处的密度、温度和压力以及恒星半径、表面温度、光度和能量转移方式等，甚至可以预计它的寿命长短和演化过程。说来奇怪，地球科学家至今不能确切地知道地球中心处物质的性质，对地球内部的其他情况也知之甚少；而天文学家却能对遥远的恒星了解得相当清楚，甚至可以计算出恒星内部任意一处的压强、温度和密度。原因在于当地球内部的原子被强烈压缩而彼此靠得很近的时候，它们的原子壳层会相互干扰，不同原子的壳层相互之间怎样作用，有非常复杂的细节，至今没有找到赖以进行计算的完整理论。而恒星内部，由于温度非常高，所有原子早就失去了它们的壳层，电子不再被束缚在原子核周围，原子核和电子都可以自由飞行（等离子体状态）。拆散成离子状态的原子核与电子所占据的空间，可能比原子状态下所占据的空间要小得多。没有了壳层之间极其复杂的关系，原子理论就变得相对简单了。即使恒星内部密度高达 100 克/厘米^3，它们仍是等离子体状态的气体，而气体的状态方程比起液体、一般固体和晶体来要简单得多。难怪爱丁顿说：“没有比恒星更简单的东西了”。

天体物理学家总结出五个在主序星内部应当满足的物理方程，它们是：质量方程、流体静力学平衡方程、光度方程、辐射转移方程和物态方程。

对这些方程先作一些简化假设：

（1）假设恒星的几何结构为球形对称结构。

（2）假设所有物理和化学性质都是各向同性的。恒星内部由许多同心球层组成，每一层内的温度、压强、密度、不透明度、化学成分等都是均匀一致的。所有物理参数和化学组成仅仅是半径的函数，使恒星结构问题成为一维问题。

（3）假设恒星内部处于稳定状态，处处满足流体静力学的平衡条件，不存在爆发现象。

（4）不考虑磁场力、潮汐力和自转。

下面导出在这些简化假设前提下的五个方程。

1. 质量方程

考虑恒星内部的某一层壳层：半径为 r，厚度为 $\mathrm{d}r$，密度 $\rho(r)$，则这一壳层的质量为 $4\pi r^2\mathrm{d}r\rho(r)$，而以 r 为半径，从球心至该壳层的球体的质量为

$$M(r)=\int_0^r 4\pi r^2\rho(r)\mathrm{d}r$$

或写成微分形式

$$\frac{\mathrm{d}M(r)}{\mathrm{d}r}=4\pi r^2\rho(r)$$

2. 流体静力学平衡方程

设半径 r 处的压强为 $p(r)$，根据流体静力学的平衡条件，球壳所受到的向外的压力和向

内的引力应当相等。球壳单位面积上受到的压力为壳内压力与壳外压力之差 $\mathrm{d}p(r)$，整个球壳受到的总压力为 $4\pi r^2\mathrm{d}p(r)$。而球壳所受到的引力为

$$-\frac{GM(r)}{r^2}\cdot 4\pi r^2\mathrm{d}r\rho(r)$$

G 是万有引力常数，负号表示力的方向与 r 的方向相反。于是有

$$4\pi r^2\mathrm{d}p(r)=-\frac{GM(r)}{r^2}\cdot 4\pi r^2\mathrm{d}r\rho(r)$$

即

$$\frac{\mathrm{d}p(r)}{\mathrm{d}r}=-\frac{GM(r)\rho(r)}{r^2}$$

3. 光度方程

光度是恒星表面的辐射总功率。辐射出去的能量应当由其内部产生的总能量补偿，恒星才能处于稳定状态。如果用 L 表示光度，ε 表示恒星内部单位质量的产能功率，则有

$$L=\int_0^M\varepsilon\mathrm{d}M$$

对于恒星内部的一层球壳，也应当满足

$$\frac{\mathrm{d}L(r)}{\mathrm{d}M(r)}=\varepsilon(r)$$

由质量方程可导出

$$\frac{\mathrm{d}L(r)}{\mathrm{d}r}=4\pi r^2\rho(r)\varepsilon(r)$$

4. 辐射转移方程

恒星的能量在很深的内部由热核反应产生，然后通过传输而达到表面并辐射出去。能量传输的方式有辐射、传导和对流三种。在简化模型中，只考虑辐射方式，并用辐射转移方程来描述。

设 $F(r)$ 为球壳表面单位面积上向外辐射的能量，$T(r)$ 为壳内温度，按斯特藩-玻尔兹曼定律有

$$F(r)=\sigma T^4(r)$$

式中，σ 是斯特藩常量。对其微分，得

$$\mathrm{d}F(r)=4\sigma T^3(r)\mathrm{d}T(r)$$

式中，$\mathrm{d}F(r)$ 是相邻球壳之间辐射本领的差异。产生差异的原因是物质对能量的吸收。吸收的相对程度与物质的密度、厚度成正比，即

$$\frac{\mathrm{d}F(r)}{F(r)}=-K(r)\rho(r)\mathrm{d}(r)$$

式中，$K(r)$ 称为吸收系数或不透明度系数，负号表示 r 越大，$F(r)$ 越小。又由光度的定义有

$$L(r) = 4\pi r^2 F(r)$$

可以导出

$$-4\sigma T^3(r)\mathrm{d}T(r) = \frac{L(r)}{4\pi r^2}K(r)\rho(r)\mathrm{d}r$$

即

$$\frac{\mathrm{d}T(r)}{\mathrm{d}r} = -\frac{L(r)K(r)\rho(r)}{16\sigma\pi r^2 T^3(r)}$$

5. *物态方程*

恒星内部设为理想气体，其物质的温度、压强和密度之间服从的状态方程为

$$p(r) = \frac{k\rho(r)T(r)}{\mu(r)m_{\mathrm{H}}} + \frac{4\sigma T^4(r)}{3c}$$

式中，$p(r)$ 是压强，$\rho(r)$ 是密度，$T(r)$ 是温度，$\mu(r)$ 是平均分子质量，m_{H} 为氢原子的质量，k 是玻尔兹曼常量。σ 是斯特藩常量，c 是光速。

以上五个方程就是求解恒星内部结构的基本方程。在实际计算中，往往不选择 r 作为自变量，而转化到以 r 为半径的球体内的质量 M_r 作为自变量。如果顾及恒星的演化，还要考虑基本方程中所有物质函数随时间变化的情况，即统统考虑为半径 r（或 M_r）和时间 t 的二元函数，而组成偏微分方程组。

恒星结构和演化计算的基本任务是：在给定恒星的总质量及化学组成等初始条件和边界条件后，求解恒星内部各种物质函数，如 $T(M_r, t)$，$p(M_r, t)$，$L(M_r, t)$，$r(M_r, t)$，$X(M_r, t)$，确定某一时刻恒星内部各处的温度、压强、辐射、半径和化学组成。计算过程当然是非常复杂的。

对于固定质量的恒星，它的演化史就是它的化学组成由于热核反应不断演变的历史。在主序阶段，恒星的质量只有轻微的损耗，由质量损耗导致的物理状态变化也是轻微的、缓慢的、连续的，所以主序星是稳定恒星。当发生质量突变的时候，就会引发恒星由一个阶段到另一个阶段的大起大落的过程。

现代理论天体物理学家，不必经过实际观测，通过高性能的计算机，就能计算出恒星的状态。这种由理论计算出来的“恒星”，称为恒星的理论模型。真实恒星当然比理论模型更加复杂，但总体来说，其间的出入是不大的。

理论与实际对比，模型太阳的直径为真实太阳直径的 92%，表面温度为 97%，辐射总功率为 75%。产生差异的主要原因是真实太阳的辐射已有 50 亿年的历史，因而在中心区堆积着较多的氦，而理论模型则假设氢与氦的比例是内外均匀的，那只是太阳刚开始热核反应时（称作原太阳）的情况。即便如此，理论模型太阳与真实太阳仍是相当接近的。

9.2.2 不同质量的主序星

不同主序星的质量各不相同，但它们的化学成分基本上是一样的：氢占 70%～75%，氦占 24%～27%，其余部分为碳、氧及其他微量元素。大部分氦不是热核反应的产出物，而是宇宙大爆炸初期创生并保存下来的（见 12.6 节）。

根据恒星模型理论，用计算机程序计算 $1M_\odot$、$10M_\odot$ 和 $0.6M_\odot$ 三种不同质量的主序星和实际观测所得这三种恒星的各项参数列于表 9.2.1。

表 9.2.1　三种不同质量的主序星的理论计算与实际观测参量

参　数		$1M_\odot$	$10M_\odot$	$0.6M_\odot$
		太阳	角宿一	天鹅座 61A
观测值	绝对星等	4.75	−3.4	7.58
	光谱型	G2	B1	K5
	距离/秒差距	/	83	3.4
	表面温度/开	5 800	24 000	4 000
理论计算值	中心密度/克·厘米$^{-3}$	100	8	65
	中心温度/万开	1 000	2 800	800
	中心压力/亿帕	13×10^7	3.5×10^7	7.5×10^7
	核反应类型	质子-质子	碳循环	质子-质子
	辐射转移方式	内层辐射 外层对流	内层对流 外层辐射	对流

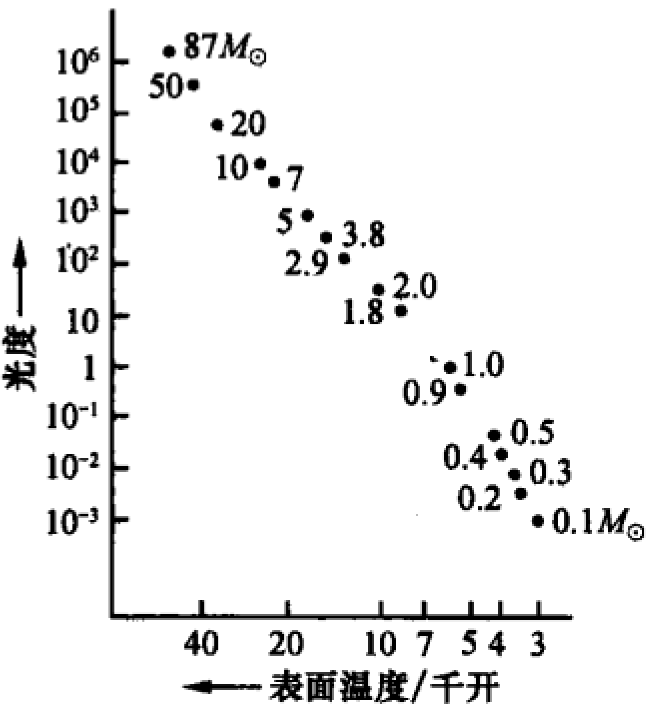


图 9.2.1　不同质量主序星的赫罗图

根据理论模型，计算出各种质量的恒星，它们在赫罗图上的位置如图 9.2.1 所示，与 5.3.2 小节给出的根据实际观测得到的赫罗图符合得相当好。说明以热核反应为能源机制的恒星内部结构理论是正确的。用同样的理论来估算恒星的寿命和演化过程也应当基本上是正确的。

恒星模型理论还告诉我们，主序阶段的恒星质量有大有小，但不能超过一定的范围：上限为 $150M_\odot$，下限为 $0.05M_\odot$。质量太小，恒星内部的温度就低到不能发生足够规模的氢-氦聚变反应，失去了作为恒星的资格。质量太大，恒星外层物质发生胀大-缩小的振动，振幅不断加强，直至把多余的质量抛射出去，不再返回。现在已知的最大质量的恒星是人马座 LBV1806-20，它的质量是 $150M_\odot$。

根据对实际恒星的统计，在银河系内，主序星占恒星总数的90%。由此可见，恒星的一生大部分时间是在主序阶段度过的。主序星阶段的特点是靠氢-氦热核反应维持其辐射。质量越大的恒星，内部温度越高，热核反应越激烈，虽然总质量较大，也经不起过大的损耗，因而维持主序的时间较短。小质量恒星在主序停留的时间要长得多。用理论模型，可以计算出不同质量的恒星在主序停留的时间如图9.2.2所示。

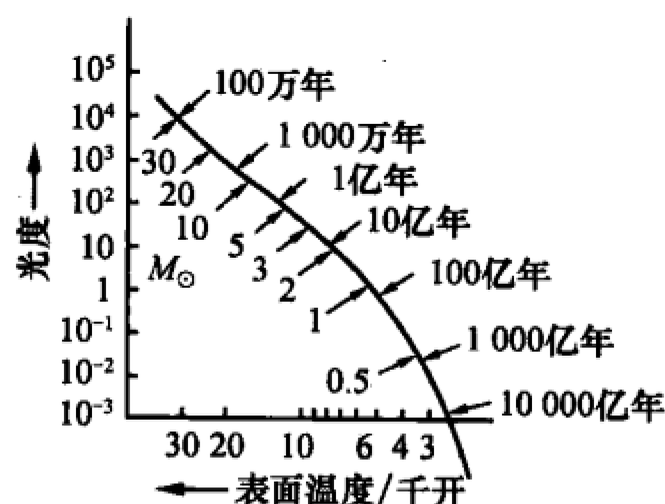


图9.2.2 不同质量恒星在主序停留的时间

9.2.3 主序前的情况

恒星起源于星际物质。星际物质充满宇宙空间，平均密度约为10^{-24}克/厘米^3，约为每立方厘米1个氢原子。星际空间的温度为10～100开，尘埃星际物质的温度低于气体星际物质。在星际物质相对集中的地方形成星云，星云的密度可达到每立方厘米几千个原子。牛顿曾提出过弥漫物质通过引力收缩而形成恒星的思想，但那只是一种臆测。系统地提出恒星起源于星云学说的，是18世纪的康德和拉普拉斯，前者更倾向于哲学上的思辨，而后者也只限于古典力学的简单推理。用现代科学方法研究这一问题的首推英国天文学家金斯（J. H. Jeans）。他根据多质点体系的动力学定理——位力定理（参见6.4节）认为，一定量的星际物质受到偶然的引力扰动（如星系中的激波或附近的超新星爆发）以后，只要质量和密度的组合满足一定条件，引力就会起主导作用而使之塌缩成密度更大的星云。当密度大到一定程度时，星云便会分裂成若干个团块。金斯指出，团块的尺度与密度的平方根成反比。密度愈大，团块的尺度愈小。当母体星云的密度变大时，它碎裂成许多个团块。团块继续塌缩。密度再变大时，又会分裂成尺度更小的下一级团块。由于温度和密度都很低，塌缩产生的热量很快散发，反抗塌缩的热压力没有形成，塌缩的速度较快，处于快收缩阶段。塌缩的过程也许会延续几代，直到某个更小的团块质量为0.05～150$M_{\odot}$时，便不再碎裂，反而会愈加聚拢，成为形成恒星的前期天体，不妨称为"星胚"。再往后，依然是引力的作用，星胚发育成胎儿，恒星宝宝便降生了。当恒星宝宝完全依靠自身的热核反应维持热动平衡的时候便进入主序，成为一颗稳定的恒星，天文学上称其为"零龄主序星"。零龄的意思是恒星演化的年龄从这里算起。恒星一生长达几十、数百亿年，而从母体星云直到主序只需数千万年，从星胚到恒星宝宝不过100万年。这一段相对较短的时间通常不计入恒星年龄之中。

母体星云同时孕育的是许多团块，因而不同质量的恒星宝宝们是成批诞生

的。现实的天文观测，无论是银河系内还是河外星系中，都发现有很多年轻恒星聚集在一起的情况，它们是从同一个母体星云中孕育出来的。恒星的孕育过程与地球上的生物完全不同。生物的胚胎是从小长到大，而恒星的胚胎是从大长到小。恒星胚胎竟然比最后的稳定恒星直径大 1 000 倍！

太阳是典型的稳定恒星。太阳的演化史可以作为恒星演化史的典型。天文学家对太阳的研究也最为充分。太阳进入主序以前的历史大致描述如下：从母体星云中分裂出来的太阳前期物质团块，直径约有 500 万 $R_\odot$，温度小于 2 000 开，密度 10^{-19} 克/厘米^3，热压力没有形成，能量不能积蓄，温度提升很慢，处于快收缩阶段，有较低水平的红外辐射。当收缩到半径 1 000$R_\odot$ 时，密度增加到 10^{-8} 克/厘米^3，热压力逐渐形成，收缩逐渐减慢；温度提升加快并出现明显的梯度，愈向中心区温度愈高；尘埃物质形成不透明外壳，使能量在内部积蓄并以对流方式传导；由塌缩物质的动能转化来的红外辐射增强；这就是“星胚”。星胚内部，由温度产生的向外的压力依然敌不过由质量导致的向内的引力，星胚物质继续向中心区降落，物质不再均匀分布，而是越接近中心越密集。中心区的氦、氢原子离散成等离子体状态。当温度升至 700 万开时，开始出现氢-氦聚变反应，压力迅速增加。中心区的压力与引力相等，达到流体静力学平衡；而外壳逐渐透明，能量主要以辐射方式传导；一个半径约 $4R_\odot$ 的“太阳宝宝”就诞生了，取名为“原太阳”。原太阳有更强的红外辐射和 X 射线辐射，周围有尘埃物质组成的薄而宽大的“星周盘”，这是日后形成行星的前期物质。原太阳的外围物质仍在向中心区缓慢降落，氢-氦聚变反应规模扩大，温度越来越高，当中心区温度达到 1 000 万开以上时，氢-氦热核反应占全部能源的 99%，可见光突然强烈地涌现出来，太阳进入主序，开始了为期 100 亿年的稳定时期。这时的太阳，直径只有胚胎时期的千分之一。从原始星云到太阳胚胎约需时 3 000 万年；从胚胎到婴儿出世约 100 万年，再到进入主序又需时 3 000 万年。前后 6 000 万年时间，与 100 亿年的稳定寿命相比，竟不算很长了。至于与太阳同时诞生的恒星姊妹们，她们于今身居何方，依人类目前的智力，当无从认知。

1967 年在猎户座星云（M42）里观测到一颗红外辐射星，温度只有 700 开，半径为 1 000$R_\odot$，刚好与木星轨道相当，这是原恒星即将形成的前期天体，同时也是被实实在在观测到的恒星胚胎。在猎户座云里还观测到一些尺度较小的星胚，有的温度更低，发出分子辐射。猎户座星云中还有一批年龄不超过 100 万年的蓝色强光度恒星。用小型望远镜即可看到的猎户座星云（好眼力的人用肉眼即可隐约看到），距离太阳 1 500 光年，那里正在孕育着成批的恒星，是离我们很近的恒星孵化场。另一个有名的恒星孵化场是距离 6 500 光年的巨蛇座鹰状星云 M16（NGC6611）（光盘图 9.2.3　斯必泽望远镜拍摄的巨蛇座鹰状星云 M16），1995 年 4 月 1 日，哈勃望远镜清楚地拍下了其中心部分的细节，有几处像“大

象鼻子”的柱状物，其中正在上演一幕恒星诞生的动人场景（光盘图 9.2.4 M16 中的“大象鼻子”；光盘图 9.2.5 “大象鼻子”尖端处恒星正在诞生）。仙后座 W5 星云，跨 4 个满月大小，距离 6 200 光年。2008 年 8 月 22 日钱德拉望远镜公布了那里正在孵化恒星的精彩照片（光盘图 9.2.6 仙后座 W5 星云正在孵化恒星）。

人马座三裂星云 NGC6514 是银河系中另一个恒星孵化场（光盘图 9.2.7 三裂星云的恒星孵化场）。光盘图 9.2.7 左图是哈勃望远镜拍摄的三裂星云中心区，箭头所指都是新生恒星；右图是斯必泽空间望远镜拍摄的对应的图。天秤座 HD141569 是带有星周盘的年轻恒星，距离 320 光年，哈勃望远镜用遮挡中央恒星的办法拍下了星周盘的照片（光盘图 9.2.8 HD141569 的星周盘）。仙后座 NGC281 星云，距离 1 万光年，显示有不同质量的恒星正在形成，兼有大量暗物质（光盘图 9.2.9 仙后座 NGC281 星云中恒星正在形成）。仙王座 IC1396 星云，距离 2 450 光年。斯必泽太空望远镜拍下的照片，像一尾美丽的金鱼。黑色的大眼睛是暗星云球状体，一些恒星胚胎正在其中形成（光盘图 9.2.10 仙王座 IC1396 星云）。人马座有一个“拱状星团”，距离 2.5 万光年，约有 2 000 颗恒星，由巨大的氢分子云包裹着。从哈勃望远镜的观测资料分析出，那里正在形成一批大质量恒星，最大的有 130 倍太阳质量（光盘图 9.2.11 人马座“拱状星团”的艺术创意）。半人马座弥漫星云 RCW49，距离地球有 13 700 光年，有约 2 000 多颗恒星正从其中诞生出来。因为有暗物质“襁褓”包裹着，在可见光波段看不清楚，但斯必泽望远镜却观测到了（光盘图 9.2.12 半人马座弥漫星云 RCW49）。在遥远的河外星系中也观测到一些恒星诞生于星云的场景。在大麦哲伦星云中就有好几处。如蜘蛛星云中的 Hodge301（光盘图 9.2.13 蜘蛛星云 Hodge301 中的恒星孵化场），仅次于蜘蛛星云的第二大星云 N11（图 9.2.14 N11 发射星云全貌；光盘图 9.2.15 N11 的局部照片 N11B）、Hen206（光盘图 9.2.16 发射星云 Hen 206 中有亮恒星正在形成）、N44F 等。在属于小麦云的 NGC602 星云中，也有一片恒星孵化场，占地 180 光年，2007 年 1 月哈勃望远镜释放的照片，像银河系内的恒星孵化场一样清晰、壮观（光盘图 9.2.17 小麦云 NGC602 星云中的恒星孵化场）。

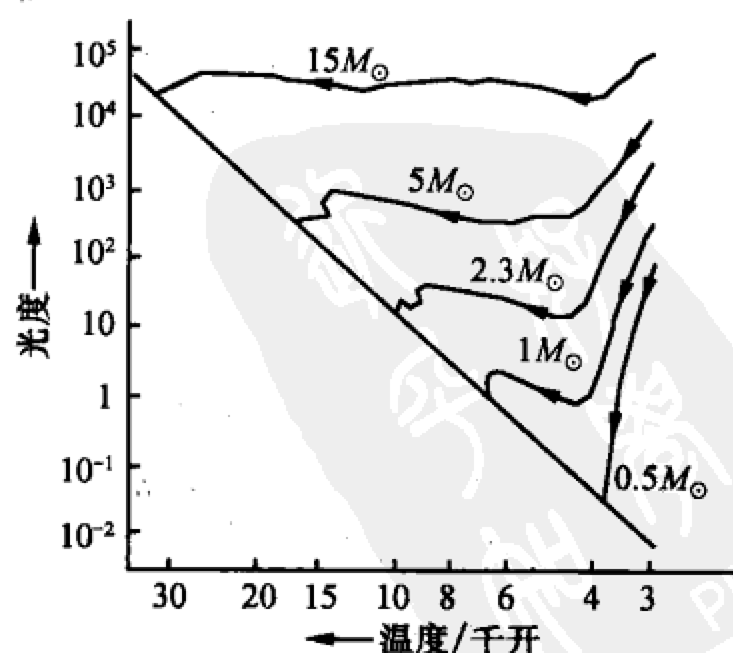


图 9.2.18 不同质量原恒星的演化进程

1965 年，日本天体物理学家林忠四郎推导出了五种不同质量的原恒星的演化进程，它们在赫罗图上的表现如图 9.2.18。这些星质量不同，演化速度

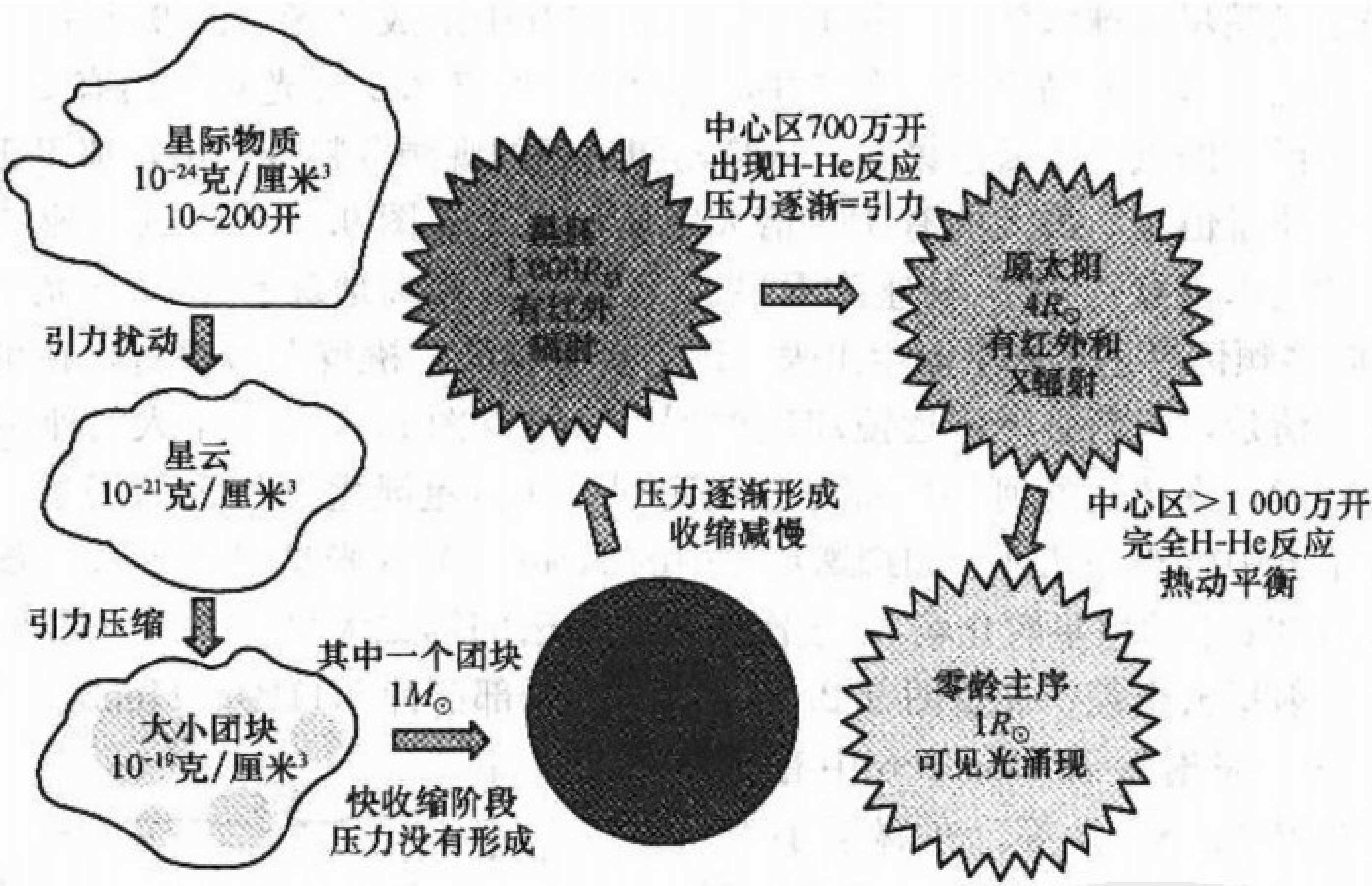
迥异。

大质量恒星只需要几万年就到达主序，而小质量恒星走完主序前期需要 3 000 万年。表 9.2.2 给出了一些具体的数据。

表 9.2.2　不同质量原恒星到达主序所需要的时间

原恒星的质量 (太阳质量=1)	到达主序所需要的 时间/年	原恒星的质量 (太阳质量=1)	到达主序所需要的 时间/年
30	3 万	1	3 000 万
10	30 万	0.5	1 亿
4	100 万	0.2	10 亿
2	800 万		

9.2.4　恒星早期演化框图



9.3　主序后的演化

主序星最主要的特征就是能源来自氢-氦热核反应。氢是燃料，氦是炉渣。当燃料逐渐耗尽，堆积的只是大量炉渣的时候，氢-氦热核反应不能继续维持，恒星结构就要起质的变化，恒星一生走过的漫长的主序阶段就要结束了。作为炉渣的氦只是元素周期表上的第 2 号元素，它还能继续聚变为后面的元素，也担当起燃料的角色，继续维持恒星的能源吗？

9.3.1 氦后元素的热核反应

在温度达到 10^8 开以上时，氦原子核将成为燃料，继续聚变为更重的元素，通常的过程为



$$^{4}_{2}\mathrm{He}+^{4}_{2}\mathrm{He}\rightleftharpoons ^{8}_{4}\mathrm{Be}$$

Be 是元素铍的化学符号，$^{8}_{4}\mathrm{Be}$ 是铍的同位素。左上的数字是质量数，即质子加中子的数目；左下的数字为电荷数，即质子数；双向箭头表示$^{8}_{4}\mathrm{Be}$ 是不稳定的，它又会迅即裂变为$^{4}_{2}\mathrm{He}$。$^{8}_{4}\mathrm{Be}$ 在地球上是不存在的，而在恒星那里，$^{8}_{4}\mathrm{Be}$ 会继续与$^{4}_{2}\mathrm{He}$ 产生聚变反应



$$^{4}_{2}\mathrm{He}+^{8}_{4}\mathrm{Be}\longrightarrow ^{12}_{6}\mathrm{C}$$

产生出的一部分$^{12}_{6}\mathrm{C}$ 还会进一步与 He 产生聚变反应



$$^{4}_{2}\mathrm{He}+^{12}_{6}\mathrm{C}\longrightarrow ^{16}_{8}\mathrm{O}$$

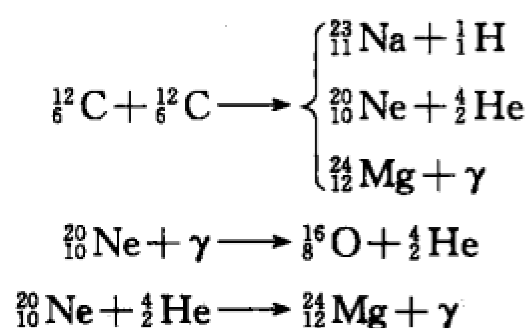
这三种反应都以氦为燃料，故也称为氦燃烧。与之对应，氢聚变为氦的反应称为氢燃烧。氦燃烧的三步反应中，第一步反应要吸收少量的能量，而后两步反应会释放大量的能量，总的释放能量的效率大约是氢燃烧的 1/5，即 1 克氦燃烧所产生的能量只有 1 克氢燃烧产生的能量的 1/5。氢燃烧的炉渣是氦，而氦燃烧的炉渣是碳和氧。

当温度高到 8×10^8 开时，新的碳燃烧和氧燃烧又发生了，产生的炉渣是镁、硅、磷、硫。这些元素的原子核所带的电荷已经很大（它们的电荷数分别是：Mg，12；Si，14；P，15；S，16），由同种元素的原子核相互接近继续聚变为更重的元素已经相当困难，因为所带电荷受电磁力“同性相斥”的影响，不容易靠得很近。电磁力又叫库仑力，不能靠近的这种限制称为“库仑壁垒”。

当温度高到 3.5×10^9 开时，镁和硅的原子核会产生另外两种类型的核反应：一类是因吸收光子而发生的光裂变反应，即由镁和硅变为原子量较小的元素铝、氖、氧，同时发射出质子（氢原子核）、中子和 α 粒子（氦原子核）；另一类是与氦原子核之间产生聚变反应而产生原子量较大的元素硫、氩、钙、钛、铬、铁、镍。后者称为 α 过程，这一过程使恒星内部在 35 亿开高温下，硅原子核最后聚变为铁原子核和镍原子核。这一过程也称为硅燃烧。铁和镍是硅燃烧的灰烬，也是恒星内部热核反应最后的炉渣。铁是所有原子核中结合能最大的物质。铁即使变成其他的原子核也不会再释放能量，相反地要吸收能量。到铁为止，在恒星内部不可能再继续进行新的核燃烧了。在一颗大质量恒星的核心部分，铁的形成标志着恒星已经濒临死亡，终将会在最后一瞬间产生极为壮烈的爆炸而结束自己的一生。

碳燃烧、氧燃烧、光裂变反应和硅燃烧直到生成铁元素为止的原子核反应过程如下。

1. 碳燃烧

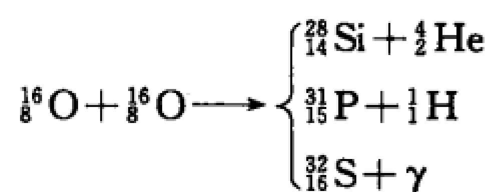


$$ {}^{12}_{6}C+{}^{12}_{6}C \longrightarrow \begin{cases} {}^{23}_{11}Na+{}^{1}_{1}H \\ {}^{20}_{10}Ne+{}^{4}_{2}He \\ {}^{24}_{12}Mg+\gamma \end{cases} $$

$$ {}^{20}_{10}Ne+\gamma \longrightarrow {}^{16}_{8}O+{}^{4}_{2}He $$

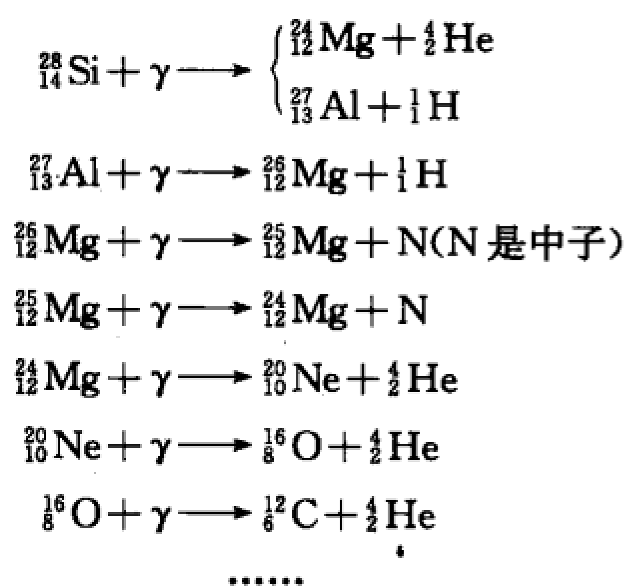
$$ {}^{20}_{10}Ne+{}^{4}_{2}He \longrightarrow {}^{24}_{12}Mg+\gamma $$

2. 氧燃烧



$$ {}^{16}_{8}O+{}^{16}_{8}O \longrightarrow \begin{cases} {}^{28}_{14}Si+{}^{4}_{2}He \\ {}^{31}_{15}P+{}^{1}_{1}H \\ {}^{32}_{16}S+\gamma \end{cases} $$

3. 光裂变反应



$$ {}^{28}_{14}Si+\gamma \longrightarrow \begin{cases} {}^{24}_{12}Mg+{}^{4}_{2}He \\ {}^{27}_{13}Al+{}^{1}_{1}H \end{cases} $$

$$ {}^{27}_{13}Al+\gamma \longrightarrow {}^{26}_{12}Mg+{}^{1}_{1}H $$

$$ {}^{26}_{12}Mg+\gamma \longrightarrow {}^{25}_{12}Mg+N \text{(N是中子)} $$

$$ {}^{25}_{12}Mg+\gamma \longrightarrow {}^{24}_{12}Mg+N $$

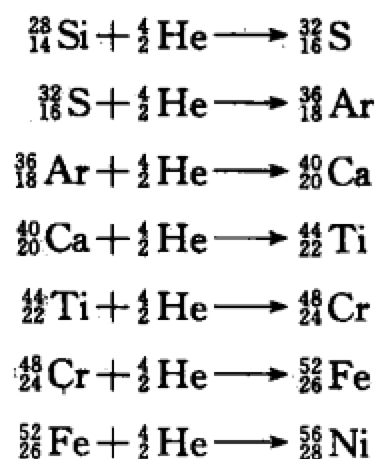
$$ {}^{24}_{12}Mg+\gamma \longrightarrow {}^{20}_{10}Ne+{}^{4}_{2}He $$

$$ {}^{20}_{10}Ne+\gamma \longrightarrow {}^{16}_{8}O+{}^{4}_{2}He $$

$$ {}^{16}_{8}O+\gamma \longrightarrow {}^{12}_{6}C+{}^{4}_{2}He $$

……

4. 硅燃烧（α过程）



$$ {}^{28}_{14}Si+{}^{4}_{2}He \longrightarrow {}^{32}_{16}S $$

$$ {}^{32}_{16}S+{}^{4}_{2}He \longrightarrow {}^{36}_{18}Ar $$

$$ {}^{36}_{18}Ar+{}^{4}_{2}He \longrightarrow {}^{40}_{20}Ca $$

$$ {}^{40}_{20}Ca+{}^{4}_{2}He \longrightarrow {}^{44}_{22}Ti $$

$$ {}^{44}_{22}Ti+{}^{4}_{2}He \longrightarrow {}^{48}_{24}Cr $$

$$ {}^{48}_{24}Cr+{}^{4}_{2}He \longrightarrow {}^{52}_{26}Fe $$

$$ {}^{52}_{26}Fe+{}^{4}_{2}He \longrightarrow {}^{56}_{28}Ni $$

恒星内部产生各种热核反应所需要的温度和必须具备的最小质量数据见表9.3.1。

表 9.3.1 恒星内部的热核反应数据

热核反应过程	近似点燃温度/开	典型运转温度/开	所需最小恒星质量/$M_{\odot}$
氢燃烧	4×10^{6}	2 千万	0.05
氦燃烧	1×10^{8}	2 亿	0.5
碳燃烧	6×10^{8}	8 亿	4
氧燃烧	1×10^{9}	15 亿	6
硅燃烧	2×10^{9}	35 亿	9

9.3.2 小质量恒星的晚期演化

当一颗质量小于 $2.3M_{\odot}$ 的恒星演化到主序晚期，核心部分的氢燃料已逐渐燃烧完毕，在那里堆积着的只是氢燃烧后的炉渣氦。在温度还没达到使氦成为新的核燃料之前，它已经没有活力来维持强大的辐射压力，于是在重力的势不可挡的影响下，核心部分迅速收缩。核心的这种收缩把大量的引力能转化为热能，使温度升高，压力也迅速增加，并将核心外围的物质推开，造成核心收缩、外壳膨胀的局面。外壳中的氢得以升温而开始了聚变为氦的反应。核心处的氦在新的温度和压力条件下开始点火燃烧。这时的恒星，核心燃烧着氦，外围燃烧着氢，活力又重新显现出来。所产生的能量使恒星外围物质愈加膨胀，表面温度降低到 4 000 开以下，发出的主要是红色的光，整个恒星表面又大又红，成为红巨星。在夜空中，有一些明显的、肉眼即可识别的红色亮星，如北河三（双子座 β）、毕宿五（金牛座 α）、大角（牧夫座 α）等都是处于这一阶段的红巨星。

当红巨星核心中所有的氦燃料耗尽以后，剩下氦燃烧的炉渣碳和氧，也会像先前剩下的氦炉渣一样，在重力作用下急遽收缩。但由于恒星的质量不够大，没有能力使核心的温度升高到使碳和氧点火燃烧的程度。收缩产生的能量只能使邻近核心的壳层中的氦继续燃烧，而更外层的氢也在燃烧，形成一种围绕着碳-氧核心的两个同心球层分别进行热核反应的状态。这一状态维持不了多久的时间，恒星的一生就走到尽头了。

在碳-氧核心丧失活力以后，整个恒星的热不稳定性显着增加。核心越来越压缩，密度越来越高。当密度达到 6×10^{7} 克/厘米^{3} 时，恒星内部所有的电子产生一种使周围空间不再被压缩的“简并压力”，温度维持在 5 万开，体积很小，光度也很小，这就是白矮星。壳层膨胀得越来越大，与核心脱离，扩展到很大的空间范围形成由弥漫物质组成的行星状星云，在接近透明的星云物质中央，显露着一颗主要由碳氧组成的白矮星。行星状星云演化得很快，它的气体以 10 到 30 千米/秒的速度膨胀，越来越稀薄。大约 5 万年之后，行星状星云被完全吹散，不复存在，只剩下孤零零的白矮星，已经完全没有任何能源，丧失了作为恒星的资格，只是恒星死亡后留下的残骸，靠生前积蓄的能量维持温度和辐射，终将会

慢慢地冷却和暗淡下去，熄灭掉最后的光辉，成为宇宙中的暗物质。

已发现的白矮星有 1 000 多颗，其中天狼星伴星是最早被确认的。当白塞耳 1834 年用天体测量方法判断天狼伴星的存在时（参见 5.4.3 小节），就知道它的质量与太阳相当，却暗到完全看不见；1862 年克拉克父子拍到它的照片，得知其亮度只有天狼星的万分之一；1917 年亚当斯（W. Adams）拍到它的光谱，才知道其表面温度在 8 000 开以上。根据质量、距离、亮度和温度的实测数据，终于可以断定它是一个密度高达 250 万克/厘米^3，而体积只有地球般大小的白矮星（据 1998 年紫外卫星观测的数据为：天狼伴星的质量 $=1.034M_{\odot}$；半径 $=0.0084R_{\odot}$）。光盘图 5.4.11 和图 5.4.12 是天狼星和天狼伴星的照片。

行星状星云已发现 1 200 多个，它们是一些外观非常美丽的天体：一袭玲珑半透的彩色薄纱，中央一颗小小的白点。天文学家们也许有些情不自禁，将它们冠以各种好听的名字，有的被形容为宝石，有的被赞誉为鲜花；岂不知它们也曾经有过和太阳一样辉煌的历史，光照宇宙上百亿年，而今正走向销声匿迹的最后结局。

M57 环状星云在天琴座中，距离 2 300 光年，宛如一围金色的池塘（光盘图 9.3.1　天琴座 M57 环状星云）。天龙座猫眼石星云 NGC6453，距离 3 600 光年，恰似一颗璀璨的宝石（光盘图 9.3.2　天龙座猫眼石星云 NGC6543，1995 年拍摄；光盘图 9.3.3　猫眼石星云 NGC6543，2004 年拍摄）；天鹅座行星状星云 NGC6826，距离 3 300 光年（光盘图 9.3.4　天鹅座 NGC6826）；狐狸座哑铃星云 M27，距离 980 光年（光盘图 9.3.5　狐狸座哑铃星云 M27）：它们都具有青翠的颜色。宝瓶座螺旋星云 NGC7293 色彩瑰丽，是比较近的行星状星云，天空面积有半个月亮大小，距离我们仅 300 光年（光盘图 9.3.6　宝瓶座螺旋星云 NGC7293）。矩尺座蚂蚁星云 Menzel 3，距离 3 000 光年，被想象成一只星空中的大蚂蚁（光盘图 9.3.7　蚂蚁星云 Menzel 3）；双子座“爱斯基摩人”星云 NGC2392，距离 5 000 光年，被想象成带着花环的爱斯基摩人头像（光盘图 9.3.8 “爱斯基摩人”星云 NGC2392）。麒麟座风筝星云 HD44179 与众不同，具有长方形对称形状，距离 2 300 光年（光盘图 9.3.9 麒麟座风筝星云 HD44179）。

太阳形成到现在，已经有约 50 亿年的历史。再过 50 亿年，太阳中心的氢将全部燃烧完，变成一个氦球。氦球一旦猛然收缩，导致壳层的氢开始燃烧，体积膨胀，温度降低，在较短的时期内，太阳将变成红巨星。这时的地球，大陆已熔化，海洋会沸腾，如果人类没有及时撤离，将会随地球一道化为蒸汽。氦球继续收缩达到一定的温度后，氦燃料点火燃烧，太阳将继续膨胀到连地球轨道也在它的肚子里。再过 20 亿年，氦燃料全部烧完之后，剩下的由碳和氧组成的炉渣又会产生第二次收缩，但因为总质量不够，温度达不到产生碳、氧热核反应的程

度，只停留在围绕着碳-氧核心，维持着双层氢、氦燃烧的阶段，已达风烛残年，离死亡不远了。太阳的最后结局是外壳继续扩散，变成行星状星云，核心沦为一颗白矮星；星云散尽之后，再经若干亿年的冷却，白矮星变为黑矮星，永无消息地游荡在茫茫宇宙之中。图 9.3.10 是天文学家给出的太阳一生在赫罗图上的演化进程。

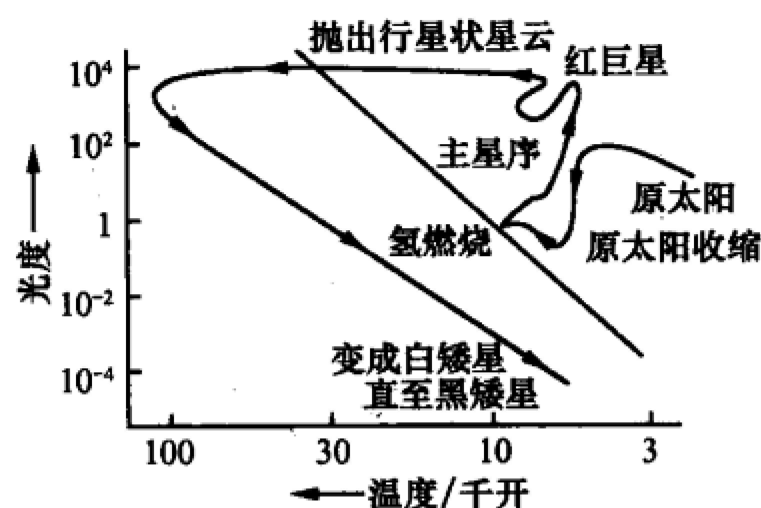


图 9.3.10　太阳一生的演化进程

9.3.3　中等质量恒星的晚期演化

如果一颗恒星的质量在（2.3～8.5）$M_\odot$ 之间，核心部分的氢燃烧完毕之后，进入平稳的氦燃烧阶段。这时的恒星如果质量较小，接近 $3M_\odot$，其表面温度约为 5 000 开，仍是红巨星；如果质量较大，超过 $7M_\odot$，表面温度将达到 1 万开，是巨星但并非红色。当中心氦燃烧完后，剩下的碳氧炉渣将继续收缩。由于总质量较大，引力势能产生的温度和密度高到足以引发碳燃烧，使核心区温度急遽升高，核聚变反应以惊人的速度进行。来不及以核心区膨胀的方式使温度下降，碳就已经全部燃烧殆尽了。这种使碳燃烧的热核反应迅速进行的过程称为“碳闪”，它在短时间内释放出来的巨大能量，也许足以导致整个恒星的爆炸。即使碳闪没有引发爆炸而使恒星演变为白矮星，它吸积周围较为浓密的星云弥漫物质，当吸积率达到足够程度时也会引起爆炸。爆炸以后，所有构成恒星的物质全部抛散到星际空间，什么也没有留下。这是超新星爆发的一种类型，通常称为Ⅰ型超新星。当然也有一种可能是吸积率较低或周围没有足够多的物质提供吸积，不能引发超新星爆炸，而以白矮星直至黑矮星的形式结束自己的一生。

9.3.4　大质量恒星的晚期演化

如果一颗恒星的质量大于 $8.5M_\odot$，由于总质量巨大，碳燃烧得以平稳进行，不致发生“碳闪”。碳核的热核反应产生氧、氖、钠和镁。与核心部分碳燃烧的同时，外壳层中也在进行着氦燃烧和氢燃烧。当核心部分的碳燃烧殆尽的时候，温度已上升到 10 亿开以上，氧聚变的热核反应又开始了，氧燃烧的炉渣是硅、磷、硫。如果温度高到 20 亿开，这些炉渣又变成了新的燃料，层层热核反应直到生成铁为止。铁是恒星内部热核反应最后的炉渣，不可能再继续燃烧。这时的恒星由一个已停止热核反应的等离子体态铁质核心和仍在分层燃烧的多层外壳组成，体积膨胀为红超巨星。肉眼可见的参宿四（猎户座 α）、心宿二（天蝎座 α）是这类恒星的典型代表。有人形容这类恒星像一只巨型“洋葱头”（图 9.3.11），

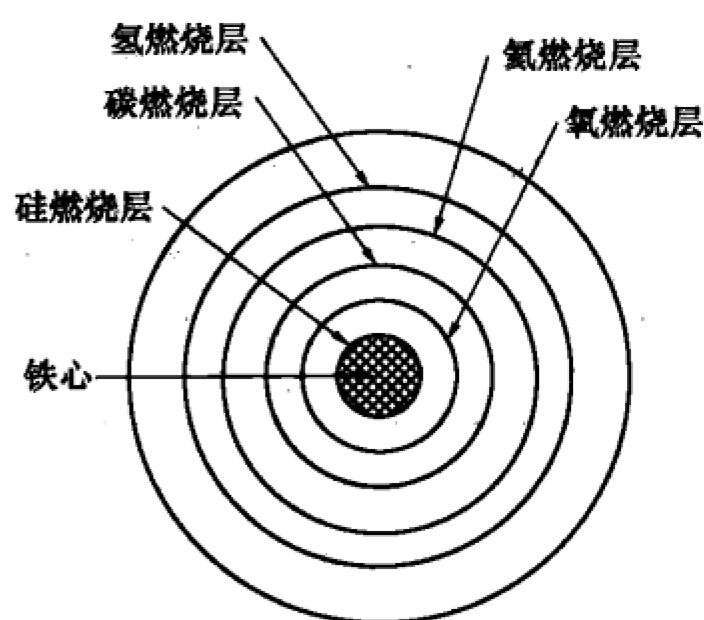


图 9.3.11　巨型“洋葱头”

因为它包含着许多由不同化学元素组成的正在燃烧着的同心层。体积大到能把火星甚至木星、土星的轨道也吞没在肚子里。这时的恒星正如一个同时进行着数百种热核反应的大炼炉，炉火越火越旺，温度越来越高，各种强烈反应的突发性也越来越强。重元素燃烧的时间短于轻元素。对于一个质量为 $25M_{\odot}$ 的恒星，氢燃烧持续的时间是 700 万年，氦燃烧持续的时间是 50 万年，碳燃烧是 600 年，氧燃烧是 1 个月而硅燃烧只有 1 天。在全部核燃烧的历程中，90%以上的时间是以氢燃烧为主的阶段，亦即主序阶段。

在离开主序之后的阶段，恒星可能多次进入体积胀缩不定的状态，表现为 5.6.1 小节介绍过的脉动变星。

当热核反应达到极致的时候，温度超过 40 亿开，光子以很高的能量穿入铁原子核，产生了使一个铁原子核分散为 13 个氦原子核加 4 个中子的裂变反应（$^{56}_{26}\mathrm{Fe} \longrightarrow 13\,^{4}_{2}\mathrm{He}+4\mathrm{n}$），继而氦原子核又分解为质子和中子，质子迅即俘获电子也变为中子，同时产生中微子，中子在恒星核心富集，而中微子逃逸出去。这几步反应不仅不能产生能量，反而要消耗很多能量。中微子逃逸又带走了大量能量。能量丧失意味着压力骤减，引力所向无敌，星核迅速塌缩，速度可达 1 万千米/秒以上。这种被称为“暴缩”的快速塌缩，使中心区密度压缩到大量中子互相挨在一起的程度。一旦外围各层的热核反应也都因燃料的枯竭而停止进行，突然失去了向外支撑的压力，由巨大质量造成的强大引力，使外层物质以超过 4 万千米/秒的速度向中心区塌缩。大量物质与高度致密的中子核心遭遇的时候，像是无数发猛烈的炮弹撞上了一堵无比坚硬的铁壁，统统反弹回来，再与正在向中心区塌缩的物质遭遇，形成强大的冲击波，携带着极其巨大的能量，毫不含糊地把整个恒星的大部分物质炸成齑粉，能量的狂飙扫荡天庭，成为壮烈辉煌的超新星。这一过程在几天之内所倾泻的能量比恒星一生正常辐射能量的总和还要多。超新星爆发以后，大部分外层物质解体为向外膨胀扩散的气体和尘埃星云，核心部分遗留下一颗高度致密的天体——中子星或黑洞。也许有一种情况是由于爆发的不对称，星云与致密天体分别移到了不同的位置。2007 年 6 月，钱德拉望远镜公布了圆规座 X-1 的 X 射线图像，并配有彩色描绘的示意图（光盘图 9.3.11　圆规座 X-1 的 X 射线图像及示意图）。这是一对发 X 射线的双星，距离 3.1 万光年。其中一个已经超爆而形成中子星，它吸积同伴蓝色巨星的物质高速旋转而发出两股喷流。

9.3.5 密近双星的演化

银河系中，双星在数量上占全部恒星的 50%以上。如果双星的一对成员彼此靠得很近，以至于发生一颗星的物质会在引力的作用下流向另一颗星的情形，这种双星称为密近双星。密近双星两子星之间的相互作用，会严重影响它们的演化进程，使其具有与单星不同的演化特征。

双星演化的机制虽然与单星演化相同，但因增加了质量流失或收聚的情况而远比单星演化复杂。影响它们实际演化进程的主要因素是每个子星的质量和相互间的距离或者是相互绕转的周期。由于质量组合和绕转周期的不同，双星演化的进程差异很大。下面以一个具体的组合模型来描述一类双星演化的各个阶段：

（1）设一对双星同时到达主序时，它们的质量为 $25M_{\odot}$ 和 $10M_{\odot}$，分别称之为 A 星和 B 星，绕转周期为 4.4 天。年龄从这时开始计算（天文上称之为零龄主序星）。

（2）在 470 万年之内，两星之间没有质量交流，各自按正常主序单星演化，能源都是由氢-氦的聚变反应提供。

（3）自 4.71×10^{6} 年开始，A 星核心区氢已燃烧殆尽，进入氦燃烧阶段，外壳膨胀，绕转周期增至 6.84 天，A 星的外围物质开始向 B 星转移。经过 1 万年之后，A 星的大部分质量转移到 B 星，由原来的 $25M_{\odot}$ 降至 $8.5M_{\odot}$，B 星的质量由 $10M_{\odot}$ 增加至 $26.5M_{\odot}$。B 星仍然维持在核心氢燃烧的主序阶段。双子星之间暂时停止了物质交流。

（4）至年龄为 5.2×10^{6} 年时，A 星核心区已经历了由氦、碳、氧和硅燃烧的阶段，发生超新星爆发，把 $7.0M_{\odot}$ 的外层物质抛射到太空，只剩下 $1.5M_{\odot}$ 的核心物质，急遽塌缩为一颗中子星，但仍与 B 星维持双星系统，绕转周期增至 11.9 天，直到年龄为 9×10^{6} 年。

（5）B 星耗尽了核心氢，进入氦燃烧阶段，外壳膨胀，变为蓝超巨星，开始以恒星风形式损失质量。A 星则从 B 吹出的恒星风中吸积物质。由于 A 星有较大的旋转角动量，吸积来的物质围绕在星体周围做旋转运动，大约在 1 万年之内，吸积物质逐渐堆积成盘状，称为吸积盘。在物质吸积过程中发出 X 射线，至后期 X 射线转变为紫外辐射甚至可见光。X 射线、紫外辐射和可见光都在垂直于吸积盘的方向逃离双星系统，成射束状发射。如在远方观测到，则成为 X 射线或光学脉冲星。

（6）又经过 1 万年，年龄达到 9.02×10^{6} 岁时，B 星已损失掉大部分质量，只剩 $8.8M_{\odot}$，绕转周期减少至 0.2 天左右。

（7）至 9.5×10^{6} 年时，B 星走完了全部演化进程，也发生超新星爆发，双星系统或幸存或瓦解，取决于爆炸时抛射质量的多少。

以上演化进程是根据演化理论通过计算机仿真计算出来的。真实情况是否与之相符，还需天文观测资料来检验。实际观测的内容包括每一颗子星的质量、半径、光谱型、亮度变化、视向速度变化、恒星风强度、质量损失率、吸积盘的情况等。

自 20 世纪 60 年代以来，对双星的大量观测取得了丰富的资料，准确度也不断提高。同时，由于计算机功能不断加强，计算中的限制条件逐渐放宽，参数选择也更趋合理，已经对多种初始质量和绕转周期的双星演化进程，进行了大量的计算，使理论模型更加完善，与实际观测逐渐趋于一致，人们对双星演化进程的认识也更加清晰可靠了。

现实观测到的双星，种类繁多，子星质量从小于 $1M_\odot$ 到 $40M_\odot$，类型有主序星、脉动变星、白矮星、中子星、黑洞、射电源、X 射线源等，周期从小于 1 小时到几百天，各自处于不同的演化阶段。要从大量实际观测资料中总结出各种组合的双星演化进程，当然是不容易的。观测和理论都还有许多不完备之处，有待于进一步的深入研究。

9.3.6　两类超新星

从已观测到的 1 000 多颗河外星系超新星爆发的光谱和光变曲线分析，超新星分两种类型：Ⅰ型和Ⅱ型。Ⅱ型超新星的光谱是连续谱，外加软弱的吸收线和发射线，氢吸收线很强，光度达最大以后下降程度先平后陡，常出现在旋涡星系的旋臂区域；Ⅰ型超新星的光谱在连续谱上还有非常宽的发射带和吸收带，但没有氢线，氢含量很低，主要由重元素组成，光度极大时比Ⅱ型高两个星等，而且下降比较缓慢，常出现在没有旋臂的椭圆星系里。Ⅰ型超新星又细分为 I_a 型和 I_b 型，它们的光谱特点是 I_a 型含有硅的吸收线，而 I_b 型没有；I_b 型有强烈的射电辐射，而 I_a 型没有。

不同类型超新星在物理机制上的联系与差别是当代天体物理的研究前沿，但尚未完全定论。一般认为Ⅱ型超新星的前身星是已形成铁核的大质量红超巨星，质量＞$8.5M_\odot$，爆发以后残留中子星或黑洞；而Ⅰ型超新星的前身星质量在 $2.3\sim8.5M_\odot$，热核反应只到碳燃烧阶段即引起爆发，或在碳燃烧阶段结束后演变为白矮星，再吸收周围物质而引起爆发，年龄比Ⅱ型老，爆发以后不残留致密天体。I_a 型超新星源于双星机制：一颗富碳白矮星不断从与之密近的红巨星伴星那里“窃取”物质，超过一定的限度后突然引发碳燃烧，导致超新星爆发。这种情况与“新星”的爆发机制相似，或者可称作超级新星爆发，成为名副其实的“超”新星，不过其爆发规模和爆发后的结局与普通新星截然不同。另有一类 I_a 型超新星是两颗密近的白矮星双星，由于引力辐射而消耗能量，相互越靠越近，最后猛烈地撞击在一起而发生的。超新星 I_b 型是近十几年才分出来的一种次型，它的爆发机制、前身星类型和爆发以后的结局，尚在争论之中，没有统一的说法。1998

年以来，发现了 γ 射线爆与超新星的关联，这类超新星列为 I_c 型（详见 10.7 节）。

I_a 型超新星有一个重要的特点是它们在光极大时的真亮度是趋同的，绝对星等都在 −20 等左右。天文学家利用这一特点，把 I_a 型超新星看成是宇宙中的标准烛光，从而可以确定其距离。

大麦哲伦星云里的超新星 SN1987A（参见 5.6.3 小节），是典型的Ⅱ型超新星。一般认为 II 型超新星的前身星都是红超巨星，但 SN1987A 的前身星却被认证为一颗大质量的蓝超巨星，星表编号 SK-69202，光谱型 B3I，质量 17～$20M_{\odot}$，半径 $50R_{\odot}$，光度 9.5 万 $L_{\odot}$，表面温度 1.3 万开。也有文献指出，它原本是一对双星，发生爆发的是其中较暗的红超巨星，而不是另一颗蓝超巨星。还有的文献认为，在爆发前 2 万年，一对双星合并成一颗蓝超巨星，然后发生超爆。

“凤凰涅槃，死而新生”，超新星爆发是一颗恒星死亡的讣告，但同时也是新一代恒星诞生的动力。超爆冲击波也许会促成弥散的星际物质聚集在一起，迈上新恒星产出的途程。宇宙中除氢、氦以外，大部分重元素，原子量在铁以前的都在恒星内部的大炼炉里形成，铁以后的只有在超爆过程中产生。也只有超爆才能使已经形成的元素从恒星内部瓦解出来，抛入太空，成为后一代天体的一部分原料。人们珍爱的贵金属以及存在于行星和生物体中的所有重元素都来自超新星爆发。有生于无，生源于死，没有往日恒星的壮烈爆发，就没有今天多彩斑斓的宇宙。

9.4 恒星演化的最后结局

9.4.1 简并

恒星有巨大的质量，由等离子体态气体组成。在万有引力作用下，恒星的每一部分物质都受到强大的指向质心的引力。如果没有另外一种与之相抗衡的力，所有物质都会向质心聚拢，快速塌缩。幸好在恒星的一生中，由热核反应产生的热辐射压力一直担任着抗衡引力的角色，抵御着恒星的塌缩趋势。一旦热核反应停止，势不可挡的塌缩会立即出现，所有物质迅速拥向质心，但这种塌缩并不是毫无限制的。当物质密度高到一定程度的时候，会有另外一种非热辐射压力起到中流砥柱的作用，这就是简并压力。

在普通物质的原子内部，电子绕原子核快速运动，由这种运动产生的力使带负电的电子不致受到带正电的原子核的吸引而坠落到原子核上。与热辐射压力不同，这种力的大小只取决于电子所在空间的量子特性，与温度无关。1925 年，物理学家泡利提出的不相容原理指出，原子中所有围绕原子核运动的电子不容许取相同的运动状态。按量子力学理论，电子的运动状态是充分量子化的，不是连续可取的，更不是任意的，状态的种数有一定的限制。如果在某一空间范围已有足够多的电子占满了所有各种运动状态，那么就不容许再多出一个电子去占据任

何一种已被占据的状态。这种情况类比于当剧场已经客满时，不容许再增加任何一位观众进场，因为所有的座位都已经占满了。这种不容许多余电子进入某一空间范围的力就是电子的简并压力。

平常密度的物质，原子与原子（或分子与分子）之间有很大的空间范围，受到压迫时，空间缩小，密度就提高。如果压迫极强，空间已塌缩到不能再小的程度，再塌缩就会出现一个原子的电子闯入相邻原子，去侵犯所有位置已经占满了的原子。这时，泡利不相容原理即刻发出警示说：不！——所有原子已经“简单”地“并”在了一起，不允许再被压缩了。这就是电子的简并压力。

泡利不相容原理禁止两个以上的电子在同一时间占据空间的同一个区域，限制着原子核周围的每一个电子只能在一定的空间范围内运动。根据量子力学的波粒二象性原则，这些电子显示出来的波特性，其波长不可能超过被限制的空间尺度。物质的密度越大，电子被限制的范围越小，波长越短，能量越高，运动越快，与运动速度及能量相关的简并压力就越大。对于平常密度的物质，电子简并压力小到可以忽略不计，但对于一颗被高度压缩的恒星，简并压力便会异军突起，竟能与引力相抗衡。

在恒星演化的各个阶段，组成恒星的物质都处于等离子体状态。一般物质随着温度的升高可经历固态、液态、气态三态。在比气态温度更高的条件下，电子不再被束缚在原子核周围，原本中性的分子和原子将离解为带负电的电子和带正电的离子，互相混合在一起。虽然整体而言仍是电中性的，但其内部却由电磁力起主要作用。这是一种新的状态——等离子体态，也叫物质的第四态。等离子体态物体可能具有很高的密度，甚至超过固态时的密度，但它仍具有气态的性质，其运动规律又与普通气态物质迥然不同。地球上很少见到等离子体，但宇宙中99％以上的可观测物质处于等离子体状态。

处于等离子体状态的恒星物质，依然受泡利不相容原理的制约。当失去热辐射压力的恒星塌缩到密度相当高的时候，恒星物质内已大大增强的简并压力就会抵抗住引力，与之相抗衡，不让它继续塌缩，使星体的体积保持稳定。由电子的简并压力与引力相平衡而保持稳定的恒星即为白矮星。引力来源于质量，质量越大引力越大。如果增加白矮星的质量，引力当然会增加，体积也将进一步受压缩，虽然压缩也导致压力的增强，但压力增强的程度抵不过引力。所以在简并压力状态下，白矮星具有特异的性质：质量越大，体积反而越小，密度当然就更大。到极端情况下，引力增大到冲过电子简并压力的屏障，电子被压入原子核中与质子聚合为中子，电子简并压力不复存在，星体立即进一步压缩。当密度相当于甚至超过原子核内部密度的时候，中子简并压力开始发挥作用，成为阻止星体进一步塌缩的又一个中流砥柱。中子简并压力就是中子与中子已经紧密地挤压在一起，抵抗进一步外来压缩的力。由中子简并压力与引力相平衡而维持稳定的恒

星即为中子星（详见 8.1 节）。中子星也具有与白矮星同样的特性——质量越大，体积越小。当质量再加大到连中子简并压力也抵挡不住强大的引力的时候，当今的物理学家认为再也没有什么力能出来抵御引力的作用，物质的密度将达到广义相对论所容许的最终境界，使星体成为神秘的黑洞（详见 10.2 节）。

9.4.2 两个重要的极限

1. 钱德拉塞卡极限

钱德拉塞卡是印度血统的美国天体物理学家，因对恒星结构及其演化理论作出的重大贡献而获得 1983 年诺贝尔物理学奖。1931 年 3 月美国《天体物理杂志》发表了他的论文，结论是：白矮星的质量有一个上限，约等于太阳质量的 1.44 倍。或者说"不可能存在质量超过 1.44$M_{\odot}$ 的白矮星"，这一数值称为钱德拉塞卡极限。1995 年 8 月 21 日钱德拉塞卡逝世，享年 85 岁。

对于我们日常所见、质量很小的物质球，物体内部的自引力并不重要。在通常的物理学概念中，一般物体都是连续体，分为弹性体（固体）和流体（液体和气体）两类。连续体内的原子或分子结合在一起的力，主要是由化学键产生的结合力，各部分物质之间的引力居次要地位；但对于质量很大的天体，引力将是主要作用力，化学结合力反而是可以忽略的了。不难计算，把地球两半拉在一起的引力达 8.75×10^{10} 牛顿/米^2。而固体原子之间的化学结合力为 10^8 牛顿/米^2，只及引力的千分之一。但对于直径 1 千米的一座小山，各部分之间的引力将小到化学结合力的万分之一。在恒星内部，自引力当然处于压倒一切的地位。恒星内部的压力和温度使所有物质都成等离子体。白矮星内部也是等离子体，但已丧失了任何热核反应的能力，仅靠电子简并压力与自引力相抗衡，它的质量上限就是钱德拉塞卡极限。

当质量超过钱德拉塞卡极限的时候，引力大于电子简并压力，星体在几秒钟内崩溃塌缩，电子越过泡利不相容原理的屏障，冲入原子核，将其击碎，同时产生粒子反应：电子与质子结合为中子，并放出中微子。中微子逃逸出去，大量的自由中子以高速射向星体中心，一直到物质压缩到半径只有大约 10 千米时，中子气体的压力又会增强到足以抵挡引力，使塌缩停止，形成一颗新的平衡星体——中子星。中子星内部 99.5%的物质是密集的中子，只有 0.5%的电子浮在其表面。中子与中子之间没有质子与质子之间那种静电斥力，唯一抵抗引力的是中子的简并压力——中子与中子挨在一起不被挤碎的力。在中子星的核里，再也没有任何"可以压缩的空间"，恒星的核成了一个巨大的主要由中子组成的原子核。

2. 奥本海默极限

奥本海默是被誉为"原子弹之父"的著名美国物理学家，第二次世界大战时

“曼哈顿计划”的负责人。1939 年他和他的学生，来自加拿大的俄裔物理学家沃尔科夫（G. M. Volkoff）最早提出中子星的质量上限，被称为奥本海默极限。

与白矮星的情形类似，中子星的质量如果越过此上限，自引力要压倒中子的简并压力，中子星的稳定平衡结构不能维持，星体继续塌缩，在远比 1 秒钟更短的时间里变为黑洞。由于对物质在极高密度下的物态方程至今仍不能可靠地了解，中子星的质量上限不如白矮星质量上限那么确定，一般估计在 2～3$M_\odot$。奥本海默和沃尔科夫 1939 年提出的值是 0.5 至几个 $M_\odot$。

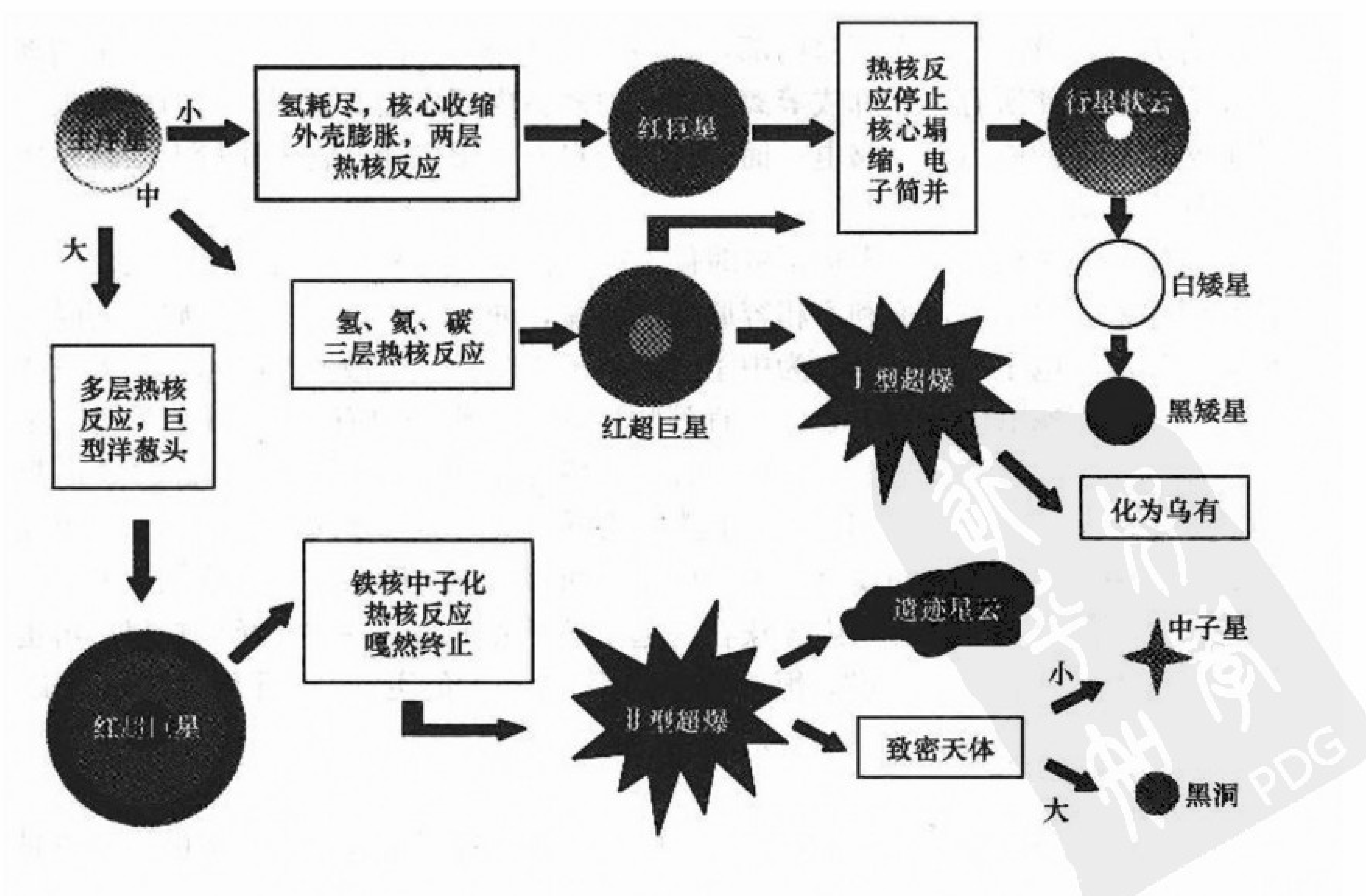
白矮星和中子星的标准数据见表 9.4.1。

表 9.4.1　白矮星和中子星的标准数据

物理量	白矮星	中子星
质量	1$M_\odot$	2$M_\odot$
半径	8 000 千米	10 千米
密度	10^6 克/厘米^3	10^{15} 克/厘米^3
温度	10^6 开	10^8 开

现代理论天体物理学已经证明，恒星死亡的最后归宿除了完全炸飞一无所有这一特殊情况之外，只能是白矮星、中子星或黑洞，不可能再有别的情形了。

9.4.3　恒星晚期演化框图



9.4.4 球状星团的年龄

前面说过：恒星的一生，主序阶段占恒星寿命的 90%；恒星的光度及在主序阶段停留的时间与其质量密切相关。如果我们发现一颗恒星正在离开主序向红巨星方向发展，就能判断它已经走完了生命的 90%（主序前的那一段忽略不计，因为进入主序的时候叫做“零龄”）再根据其质量就能确定它的年龄。但是，孤立的一颗恒星，无论它正在主序里还是已经离开，我们无法确定它究竟将要何时离开，或曾经何时离开。对于球状星团，事情就有了头绪。球状星团恒星密集，星数很多，而且分布广泛，较容易观测到。描绘球状星团的赫罗图，发现存在普遍的规律。以 5.5 节提到过的猎犬座球状星团 M3 为例（光盘图 5.5.21 猎犬座球状星团 M3），它的赫罗图如图 9.4.1 所示。主序的左上部分几乎空白，因为大多数大质量、高光度星都已离开主序，进入红巨星阶段；右下部分还有大量恒星仍留在主序中，还没有发育到离开主序的年龄。主序上有一个明显的拐点。球状星团恒星的成团性非常强烈，它们应当是年龄相同的恒星，只是因为质量大小不同而寿命迥异，大质量的已濒临衰老，小质量的正值青壮年。位于拐点处的恒星应当处在刚要离开主序的时候，据此就可以判断整个球状星团的年龄。当然也不是非常明确的判断，有一定的模糊程度。M3 的年龄大约为 8×10^9 年。

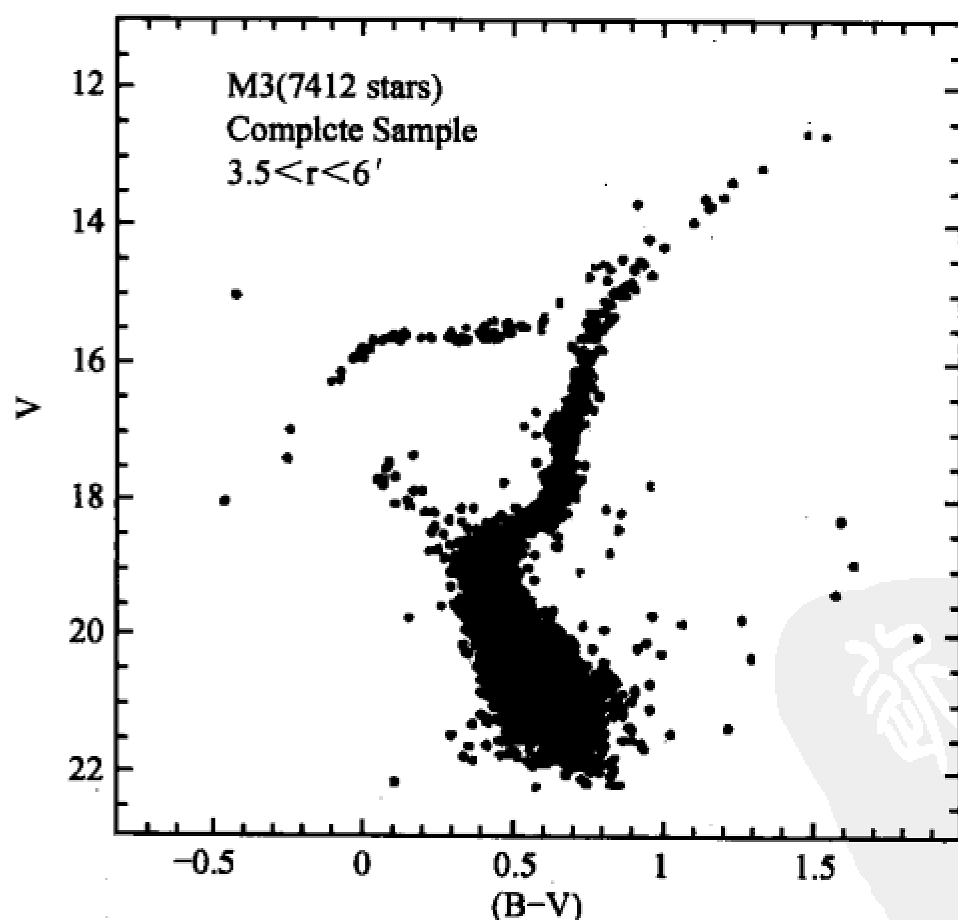


图 9.4.1 球状星团 M3 的赫罗图，增补

球状星团的年龄都比较老，最老的达到 114 亿年。这一年龄构成了宇宙年龄

的下限。第 12 章将要提到，“大爆炸”宇宙模型提出的早期，对宇宙年龄的推算远小于球状星团的年龄，令人不得不疑惑它的正确性，因为“妈妈的年龄不可能比女儿的年龄更小”（参见 12.4 节）。

测量恒星年龄还有一些其他的方法，如放射性元素半衰期的方法等，不再一一介绍了。

9.4.5 泡利不相容原理与电子在原子中的运动状态

泡利不相容原理是说，原子中所有围绕原子核运动的电子不容许取相同的运动状态，即处于完全相同状态的电子是不相容的。

按量子力学规则，电子的运动状态由 4 个量子数来描述，这 4 个量子数是：

n——主量子数，由电子的能级确定，只能取正整数。不同 n 的电子位于不同的原子壳层上，有不同的能级。n 越小，能级越低。n 的顺序按电子出现概率最大的地方离原子核的远近来划分，距离越近，n 越小。已知各种化学元素 n 的最大值为 7。约定 $n=1$，2，…，7，对应于字母 K，L，M，N，O，P，Q。

l——副量子数，或称角量子数，属于同一壳层的电子，角动量不同，l 值就不同。l 的值只能取 0，1，2，…，$(n-1)$，对应于字母 s，p，d，f，g，…数字越小，能量越低，也称亚层。

m——磁量子数。同一 l 值的电子，角动量所取的方向不同，它们在不同的轨道上。m 值的个数即电子运动的轨道个数，m 的取值为 0，±1，±2，…，$\pm l$。对于某一 l 值，m 的个数为 $(2l+1)$，顺序由 m 值从大到小排列。

m_s——自旋磁量子数，表示自旋方向。同一轨道上最多只允许两个电子，自旋方向相反。m_s 的取值为 1/2 及 $-1/2$。

泡利不相容原理不允许一个原子里有 2 个以上电子的 4 个量子数完全相同。根据以上规则，第 n 个壳层上的电子数量最多为

$$\sum_{l=0}^{n-1} 2(2l+1) = 2n^2 \text{ 个}$$

具有 k 个壳层的原子，最多可容纳的电子数为

$$N = \sum_{n=1}^{k} 2n^2$$

如 $k=2$，$N=10$；$k=3$，$N=28$；$k=4$，$N=60$ 等。

表 9.4.2 给出了不同状态的电子，按能量从小到大为序，各量子数的排列。每一组量子数 (n, l, m, m_s) 表示一种状态，它只能属于一个电子。表中只给到 $n=1$，2，3 三个能级，即对应于 K 层，L 层，M 层。至于 $n=4$，5，6，7 等能级，则对应于 N，O，P，Q 等层的状态数，可以此类推。K 层有 2 种状态，L 层有 8 种，M 层有 18 种，N 层有 32 种，O 层有 50 种，P 层有 72 种，Q 层有98 种。

表 9.4.2 按能量排列的电子的量子数

	n	l	m	m_s			n	l	m	m_s	
$n=1$	1	0	0	1/2	$l=0$	$n=3$	3	0	0	1/2	$l=0$
K层	1	0	0	−1/2	s	M层	3	0	0	−1/2	s 亚层
$n=2$	2	0	0	1/2	$l=0$		3	1	1	1/2	$l=1$
L层	2	0	0	−1/2	s		3	1	1	−1/2	p
	2	1	1	1/2			3	1	0	1/2	亚层
	2	1	1	−1/2			3	1	0	−1/2	
	2	1	0	1/2	$l=1$		3	1	−1	1/2	
	2	1	0	−1/2	p		3	1	−1	−1/2	
	2	1	−1	1/2			3	2	2	1/2	$l=2$
	2	1	−1	−1/2			3	2	2	−1/2	d
							3	2	1	1/2	亚层
							3	2	1	−1/2	
							3	2	0	1/2	
							3	2	0	−1/2	
							3	2	−1	1/2	
							3	2	−1	−1/2	
							3	2	−2	1/2	
							3	2	−2	−1/2	

不同化学元素的原子结构，受能量最小原理的支配，电子总是从最小能量的位置开始排列，首先占满能量最低的状态，然后依次占满能量较高的状态。对于原子序数为 Z 的化学元素（Z 为核电荷数，也是核外电子数），它们的电子总是依次占满前 Z 个位置。例如氢元素，$Z=1$，它唯一的一个电子一定处于第一种状态（1，0，0，1/2）；氦元素，$Z=2$，它的两个电子一定占据 $n=1$，$l=0$ 的前两种状态（1，0，0，1/2 和 1，0，0，−1/2）等。所有化学元素都是按这种量子顺序排列，这就是化学元素周期系的量子依据。各种元素的物理性质和化学性质都有规律地反映在元素周期表中。表 9.4.3 列出了前 18 种元素各电子层的电子数。从钾（$Z=19$）开始，电子不完全按 n 的顺序排列状态数，因为出现了由于电子间相互作用而能级错落的情况。电子顺序是按能量大小排序的。由光谱实验可以归纳出它们排序的情况。

表 9.4.3 前 18 种化学元素的电子状态分布

原子序数 Z	元素符号	各电子层上的电子数				
		K层，$n=1$	L层，$n=2$		M层，$n=3$	
		s 亚层 $l=0$	s 亚层 $l=0$	p 亚层 $l=1$	s 亚层 $l=0$	p 亚层 $l=1$
1	H	1				
2	He	2				
3	Li	2	1			
4	Be	2	2			
5	B	2	2	1		

续表

原子序数 Z	元素符号	各电子层上的电子数				
		K层，$n=1$	L层，$n=2$		M层，$n=3$	
		s 亚层 $l=0$	s 亚层 $l=0$	p 亚层 $l=1$	s 亚层 $l=0$	p 亚层 $l=1$
6	C	2	2	2		
7	N	2	2	3		
8	O	2	2	4		
9	F	2	2	5		
10	Ne	2	2	6		
11	Na	2	2	6	1	
12	Mg	2	2	6	2	
13	Al	2	2	6	2	1
14	Si	2	2	6	2	2
15	P	2	2	6	2	3
16	S	2	2	6	2	4
17	Cl	2	2	6	2	5
18	Ar	2	2	6	2	6

第 10 章　黑　　洞

在广漠沉寂的星空里，我们为失去的太阳悲泣……

——约翰·德拉维尔·德迈蒙

如果说我们所谓的事实是变化着的阴影，那么这阴影正是永恒真理之光投下的。

——爱丁顿，《科学与未知世界》

黑洞是恒星的一种残骸，它是引力收缩的极点，极端到近乎荒唐。但在我看来，它又是最精美的。了解黑洞并深感困惑之后，会看到一个更加深邃的天空，进入展示时间、空间和物质的深刻本质的新视野。

——约翰·皮尔·卢米涅

10.1　黑洞的数学模型

1796 年，拉普拉斯在《宇宙体系论》里有一段话："天空中存在着黑暗的天体，像恒星那样大，或许也像恒星那样多。一个具有与地球同样的密度而直径为太阳 250 倍的明亮星球，它发射的光将被它自身的引力拉住而不能被我们接收。"拉普拉斯描述的这种天体，是表面逃逸速度大于光速的天体。根据本书 4.4.2 小节，天体的逃逸速度 $v_1 = \sqrt{2G(M+m)/r}$，M 是天体的质量，m 是飞行器的质量，r 是天体的半径，G 是万有引力常数。忽略 m，将拉普拉斯假设的天体半径和质量代入此式，计算其表面逃逸速度刚好大于光速。那时候虽然还没有现代量子力学中的光子概念，但牛顿的光是粒子的学说已经建立起来了。1676 年丹麦天文学家罗默（O. C. Romer）根据对木星卫星的观测提出光以有限速度传播的思想，1678 年惠更斯测出了光速的数值。拉普拉斯提出，由于光粒子的速度小于天体表面的逃逸速度，它便不能从这种天体的引力束缚中逃逸出来，因此从远处看这个天体便是黑暗的。尽管"黑洞"一词是迟至 1968 年才由美国天体物理学家惠勒（J. A. Wheeler）在一次讲座中首先提出（讲座的题目是"我们的宇宙，已知的和未知的"），但拉普拉斯描述的正是黑洞这种天体。

1915 年 12 月，爱因斯坦广义相对论发表刚一个月，德国天文学家卡尔·史瓦西（K. Schwarzschild）即得到了一个用广义相对论的弯曲空间概念描述的球状物体周围引力场的精确解。这时正值第一次世界大战，史瓦西接受征召入伍，与俄国军队作战。他从前线把论文寄给爱因斯坦。1916 年 1 月 13 日，爱因斯坦

代表史瓦西在柏林普鲁士科学院的一次会议上报告了这篇论文，并在此前 4 天寄给史瓦西一封信，信中提到："我没有料到有人能用如此简洁的方法得出这个问题的精确解，您对问题的解析处理令我极为满意。" 4 个月后，1916 年 5 月 11 日，史瓦西即因服役期间不幸生病而与世长辞，年仅 43 岁。爱因斯坦在为史瓦西写的悼词中说："这位有高度才能、学问渊博的科学家的早逝，不仅是我们科学院，而且也是天文学界和物理学界所有朋友们的悲痛和损失。" 当时他年仅 4 岁的儿子马丁 · 史瓦西（M. Schwarzschild），后来也成为一名出色的天文学家。

史瓦西的解指出，如果致密天体的全部质量压缩到某一半径范围内，它周围的空间就因引力而足够弯曲到任何物质和辐射都逃不出来，这一天体就成为黑洞。后人称这一半径为史瓦西半径，也称引力半径或临界半径。其计算公式为

$$R_g = \frac{2GM}{c^2}$$

式中，G 是万有引力常数，M 是天体的质量，c 是光速。G、c 都是常数，史瓦西半径 R_g 只与质量有关。如果以太阳质量为质量 M 的单位，R_g 以千米为单位，则 R_g 的数值为 $R_g = 2.95M$ 千米。按此式计算，如果太阳的全部质量都压缩到半径 2.95 千米的范围内，太阳就成为黑洞。地球成为黑洞的条件是把全部地球质量都压缩到半径只有 8.9 毫米的小球体内。按照史瓦西解，在临界半径范围内，空间和时间都丧失了原有的特征，所有用于测量距离和时间的规则都失效了，时间趋于无限，而距离变为 0。用爱丁顿的话说："这种奇异的时空世界是我们无法在其中进行任何测量的怪圈。"

虽然用拉普拉斯提出的逃逸速度概念也能推导出与史瓦西半径同样的结果，但牛顿经典力学体系与广义相对论这两种不同的理论，从根本上是不相容的。按照牛顿理论，对于逃逸速度大于光速的天体，光子虽逃不脱该天体引力的约束，但仍然可以从星球表面射出到一定高度，然后再返回该星球，就像我们在地球上抛掷一块石头，尽管其速度远小于地球表面的逃逸速度，石头仍能在空中飞行一段时间。而按照广义相对论，光子根本不可能离开黑洞表面，最多只能贴着表面环绕飞行。黑洞表面像是一张由光线织成的网，任何一个光子绝不能逃脱出来。外界看来，它完全是黑暗的。拉普拉斯计算的是一个实体星球，而史瓦西半径给出的仅是一个理论上不可视的界面，称为视界。视界不是黑洞物质的实体边界，只是一个几何位置。黑洞物质全部集中在黑洞中心的一个几何点上，这个只有质量没有体积的几何点称为奇点。借助于逃逸速度来描述黑洞，虽然有着重要的历史价值和启发作用，却是过于简单了。

史瓦西描述的黑洞是一种球形无转动的黑洞。1962 年，新西兰物理学家克尔（R. P. Kerr）给出了因转动而非球形的黑洞的引力半径，称为克尔半径，它的计算公式为

$$R_g = \frac{GM}{c^2} + \sqrt{\frac{G^2M^2}{c^4} - a^2}$$

式中，$a = J/Mc$，J 是旋转角动量。当 $J = 0$ 时，即还原为不旋转的史瓦西半径。

无论克尔还是史瓦西，都同拉普拉斯一样，只是从理论上推导出来某种数学模型。符合模型的真实天体是否存在以及在何种条件下才能形成这种天体，是数学模型本身无法回答的。

10.2 黑洞的物理机制

太阳这样的恒星能被压缩成为半径只有 3 千米的球，这种设想在史瓦西的时代同在拉普拉斯的时代一样是不被接受的。在当时的科学家看来，那只是一种纯理论的推导，甚至只是一种数学游戏而已。

1917 年天文学家证实了天狼星伴星是一种高度致密的白矮星，其密度是水的 250 万倍。但是要使之成为黑洞，密度还需要加大 1 000 亿倍，这是令当时的物理学家难以置信的。即使不久后问世的量子力学已经阐明了简并概念和引力塌缩的可能性，作为广义相对论最伟大的卫士之一，号称世界上真正懂得广义相对论三人之一的英国天文学家爱丁顿也怀疑黑洞存在的真实性。他认为："必定有一条未知的自然定律，会阻止恒星塌缩为黑洞这种荒唐行为!"

1939 年，奥本海默等物理学家运用广义相对论方程计算了没有热核反应的大质量"冷"恒星，在击败了中子简并压力之后，塌缩到史瓦西半径以内而成为黑洞的真实过程，最后结局是：物质连同时空一道，塌缩到任何物质和能量都不能逃脱的范围之内，集中到一个体积为零、密度为无限大的点——奇点。达到这种状态的恒星就丧失了向外部世界发送任何信号的可能性，而成为黑洞。这种能塌缩为黑洞的冷恒星，质量数至少要达到奥本海默极限，较为宽松的估计是 $3M_\odot$（详见 9.4.2 小节）。如果宇宙中有一颗质量超过 $3M_\odot$ 的恒星，已经停止了一切热核反应，它将不可避免地塌缩为黑洞。这是有真实物理过程支持的理论，而不仅仅是数学游戏。已知银河系中的恒星，很大一部分质量超过了 $3M_\odot$，甚至有大到 $100M_\odot$ 以上。恒星在几十亿年甚至更长的演化过程中以星风的形式损失质量。虽然在主序星阶段，质量丢失不多，但在主序后期将以行星状星云或超新星爆发等形式大量丢失。质量越大的恒星，星风损失越严重。大质量恒星临终之时，将在超爆过程中一举丢失全部或大部分的质量。如果无论恒星的初始质量有多大，星风或超爆造成的质量损失总能使其最后质量小到 $3M_\odot$ 以下，恒星演变成黑洞的可能性就没有了。反之，在 137 亿年的宇宙历史中，若有相当数量的恒星在完全丧失了热核反应的能力之后仍保有 $3M_\odot$ 以上的质量，它们应已演变

成黑洞，隐藏在深不可测的宇宙中。

用大型高速计算机仿真计算质量为 10～100$M_\odot$ 的恒星，在热核反应停止并经历超新星爆发以后，有两种可能形成黑洞的情况：

（1）当简并核心的质量大于奥本海默极限时，塌缩将直接导致黑洞形成。

（2）核心质量小于奥本海默极限而形成中子星，外围仍有被抛射后的残余物质又继续落向中子星，积累到质量超过奥本海默极限，再度塌缩为黑洞。

还有一种可能的机制是，在双星系统中，其中一颗已形成中子星，以后在一段很长的时间中，中子星不断捕获来自伴星的物质并堆积起来，由于堆积的进度很慢，不至于引起像新星或超新星爆发那样炸散这些物质，直到总质量堆积到超过奥本海默极限而塌缩成黑洞。

总之，在恒星漫长的演化旅途中，正如法国天文学家卢米涅（J. P. Luminet）所说："黑洞的出现标志着引力在恒星一生中的控制作用取得了最后胜利。""恒星的一生就是对自身重量的持久、拼死的反抗。持久，是因为恒星在演化的每个阶段都能有新的能源来维持自己；拼死，是因为这个反抗注定是要失败的，或迟或早，引力终将战胜，恒星终将塌缩。"

10.3　黑洞的奇妙性质

10.3.1　视界

彭罗斯定义的黑洞视界是"所有试图逃逸出去的光子统统都被引力拉回的最后的边界"；霍金定义的黑洞视界是"空间中是否有能力向遥远宇宙发送事件信号的最后的边界（视界外的事件能发送，而视界内的事件不能）"。这两个定义是等价的。视界将黑洞与宇宙的其他部分截然分裂，外部的物质和能量可以进入视界，而视界内没有任何物质和能量可以逃逸出去。

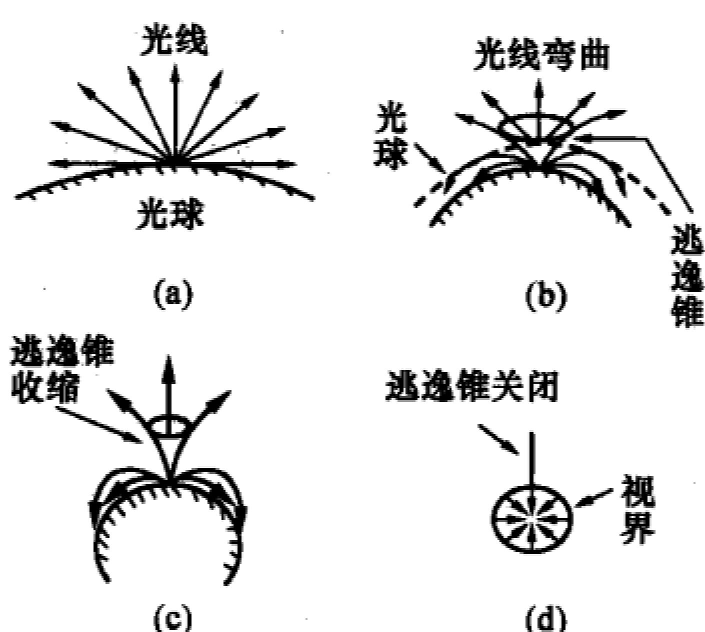


图 10.3.1　光被塌缩恒星囚禁的过程

按广义相对论的时空弯曲理论，恒星质量塌缩到史瓦西半径以内，时空将完全封闭，光球消失，黑洞形成。图 10.3.1 显示了一个球对称恒星引力塌缩过程中四个阶段光子发射的情况，其中（a）是塌缩以前的情况，从恒星表面发出的光子可以朝任何方向沿直线射出；（b）显示恒星半径开始塌缩，时空弯曲程度增加，一部分光子落回恒星表面；（c）显示恒星已塌缩到

临近史瓦西半径，大部分光子落向恒星表面，能够逃逸出去的光子局限在一个锥形空间里；(d) 显示恒星已塌缩到史瓦西半径，光子能够逃逸的锥形空间完全关闭，全部光子都被囚禁起来，谁也别想逃逸出去。

史瓦西半径决定的“视界”把时空分为截然不同的两部分。视界以外，通过光信号可以在任意距离上互相联系，这是我们所观测到的正常宇宙；而在视界以内，所有光线只能向中心集聚，任何两点之间或它们同视界以外都不可能有任何信号联系。物质和辐射只能由视界以外进入，一旦越过视界，都无一例外地继续塌缩到中心奇点；任何物质和辐射都不能从视界构筑的囚笼中向外逃逸。中心奇点处体积为 0，密度为无限大；在那里，所有物质都被压缩到极限，时空无限弯曲，因而时空不复存在。这就是黑洞。说它“黑”，是因为光子不能逃逸，外界看不见它，它是黑的；说它是“洞”，是因为外界的物质一旦落入视界就永无出头之日，落入多少就被吞噬多少，它是一个无底深洞。

10.3.2 引潮力

4.2.6 小节已经介绍过引潮力和洛希极限的情况。地球上海水的潮汐现象来自月球和太阳的引潮力。引潮力不等于直接引力，而是由一个天体对相邻天体不同位置处引力之差造成的。引潮力的强度依赖于产生它的天体的质量和受力物体所在的位置。距离越近，引潮力越大。在黑洞周围，引潮力十分强大。一个直立着头朝黑洞飞行的航天员，他的身体就被引潮力拉长。一个质量为 $10M_{\odot}$ 的黑洞，对于普通密度的物体，洛希极限为 400 万千米。落入这一范围的航天员会被引潮力撕成碎片。设想这位航天员有神奇的刚性，能抗拒撕碎他的引潮力，那么到达视界时，他所受到的引潮力犹如把他的头吊在地球表面的一根钢梁上，而在他的脚下绑吊着 2 000 万人口的总重量（在地球表面上人体受到的来自地球的引潮力只有 0.6 克）。引潮力使任何物体在一个方向上被拉长而在另一个方向上被挤压。一头栽入黑洞视界的航天员在到达奇点时，将被拉成无限长，而在另一个方向上被压得没影儿了。奇点处极端的空间曲率能令他身长无限却不能将头钻出黑洞视界。他的头和脚都被拉进奇点但却分离无限远。这真是不可思议的奇妙性质。

10.3.3 时空特性

在正常宇宙里，时间是一维的而空间有三维。在三维空间中有前后、左右、上下三个维度，朝任何方向的运动都是可能的。时间只有一个维度，而且只能向前不能向后。时间的后退意味着因果关系的颠倒：你先感觉被砸痛，然后才发生一个网球砸到你头上这件事，而这是不可能的。科幻电影中乘光子火箭落入时间隧道因而可以追回已经逝去的事物，这从根本上违反了相对论关于光速不可超越的前提。

在黑洞内部，一切物质只能径直落向中心奇点，没有别的方向可以选择，因而空间是一维的；时间虽然仍旧保持着因果关系不能颠倒的一维性，但时间出现了尽头。对于任何进入视界的物质，到达中心奇点意味着时间已经终结，一切物理定律突然会变得毫无意义。奇点是空间、时间都不复存在的终极之点。从视界到奇点，这段“缓死”的时间是可以计算的。黑洞质量越大，时间越长。对$10M_{\odot}$的黑洞，是10^{-3}秒；对星系级的巨型黑洞，可以长达几小时。

10.3.4　时间冻结

狭义相对论的时空效应是尺缩和钟慢。钟慢效应表现为在与观测者作相对运动的坐标系中，时间要流逝得慢一些。著名的双生子佯谬是说明钟慢效应常举的例子。年龄30岁的哥哥以99%的光速飞到距离20光年处再返回时，他的飞行时间花了6年，年龄是36岁，几乎没有太大的生理变化。但回来时本来同龄的弟弟已经变成70老翁，离哥哥出行已经整整40年了。“佯谬”之处，是可以辩解为哥哥没有动，而弟弟以相反的方式飞离之后又回到哥哥身边，那么应当是哥哥比弟弟老了34岁。回答这一辩解可以有两条思路：一条是如果兄弟之间永远以等速相对运动，确实会彼此都觉得对方年轻，但这样一来兄弟不可能重逢。现在是参与飞行的哥哥有一个折返加速的过程，而弟弟却没有，因此二者是不等价的，不能互换位置进行模拟。另一条思路是现实宇宙中不是只有兄弟二人，相对于恒星和寥廓宇宙中的诸多天体，哥哥在飞行并且有加速运动而弟弟却没有，他们的地位也不可能是等价的。

狭义相对论用常识很难理解，但有一句名言说：真理不一定是常识。利用高精度原子钟的现代实验已经测量出在宇宙飞船里的钟确实比地面实验室里同样的钟走得慢一些。狭义相对论描述的是一个理想化的只存在惯性运动的没有引力的宇宙。现实宇宙中处处都有引力，只能用广义相对论才能完满解释。在广义相对论中，引力也产生钟慢效应。楼下的钟会走得比楼上的钟慢，因为楼下离地球中心更近，引力场要强一些。注意这里所说的钟慢不是指摆动周期因重力位不同而产生的变化，而是时空本性的变化。1971年水手号探测器所做的太空雷达实验也证明了现实宇宙中的钟慢效应。黑洞周围引力场十分强大，钟慢现象应当突出地表现出来。

设想一艘宇宙飞船去执行探测远方某个黑洞的任务。有高超的技术使宇宙飞船不断有信号向地球报告他们的消息；而且宇宙飞船足够坚固，不致被黑洞的引潮力摧毁。由于受黑洞引力的影响，相对于地球钟而言，宇宙飞船上的钟越来越慢，以至于在接近视界的时候，航天员飞速前进，而在地球人看来，一切进展越来越慢。几代地球人旷日持久地监测着宇宙飞船艰难地向黑洞进发的情景，而宇宙飞船上的航天员却没有感觉时间变慢，他们依然年轻，一切正常，即使临跨越

视界前也没有发现特别的事情。当然一进入视界，马上便灾难临头，宇宙飞船一头栽入奇点，一切都粉身碎骨，荡然无存，时间和空间都到了尽头。可是地球上的监测者却永远都看不到这最后的几幕。这不仅因为视界内的事物永远传不出来，还因为宇宙飞船到达视界时，钟慢已经达到了极限，信号传递的过程需要无穷长的时间，时间被“冻结”了，事态的发展被永远定格在那里，而且在这之前，由于强大引力场产生的引力红移，使电磁波信号波长越来越长，能量越来越弱，画面越来越模糊了。到达视界时，信号波长达到无穷大，完全丧失了传播能力。在监测者的屏幕上，什么也看不到了。

10.3.5 黑洞无毛和黑洞蒸发

一般物体都是由亿万个分子、原子组成的，具有极为复杂的结构。对它们的完整描述，包括对每个原子和分子状态的描述，需要亿万个参数。即使被爱丁顿称为“再简单不过”的恒星，也都具有质量、光度、体积、电磁状态、化学组成、核反应情况、大气和内部结构等多种参数。相对而言，黑洞才是真正简单的物体。它最多只有质量、角动量和电荷 3 个参数。任何物质一旦跌入视界，将没有任何信息能从视界内传递出来，黑洞内部的一切细节对外界来说都是毫无意义的。黑洞能提供给外界的只有上述 3 个参数。黑洞一旦形成，就失去了其前身物质的一切性状和身份，不保存其以前所具有的诸多复杂参数的任何信息和记忆，保留下来的只有质量、角动量和电荷。这种消繁归简的特征被“黑洞”一词的首创者惠勒形容为“黑洞无毛”。

黑洞具有电荷的原因是作为黑洞前身的恒星都有电磁场，黑洞形成以后还从星际介质中吞噬带电粒子，因此在黑洞视界周围形成带电的外部时空。不过绝大部分电磁属性已被引力波带走，只留下总电荷这个参数。按理论计算，一个 $10M_{\odot}$ 质量的黑洞所带电量最多为 10^{40} 个电子的电量，通常比这个电量小得多。当然黑洞带正电和带负电的可能性一样大。

黑洞具有角动量的原因是作为黑洞前身的恒星都有自转，形成黑洞以后依然保持着转动特性。恒星由于自转而不是严格正球形，黑洞的视界也由于有转动而变得比球形黑洞复杂，由克尔公式描述。

只由质量、电荷、角动量描述的黑洞有四种类型：最简化的无电荷、无转动的球对称黑洞——史瓦西黑洞；有电荷、无转动的球对称黑洞——雷斯勒-诺斯特诺姆黑洞；无电荷但有转动的黑洞——克尔黑洞；又带电荷又有转动的黑洞——克尔-纽曼黑洞。

黑洞蒸发的概念是英国传奇式天文学家、坐在轮椅上的霍金 1974 年提出来的。根据量子场论，真空不是绝对的空虚，真空在不断地产生着正、负粒子对，并且又很快湮灭。这些正、负粒子对存在的时间极短，又不能直接探测到，故称

为虚粒子对。产生和湮灭的概率相等，所以平均说来，就没有任何新的粒子真正产生出来，或已有的被消灭掉。1947年兰姆（W. E. Lamb）和库什（P. Kusch）通过著名的“兰姆位移”实验，验证了这一理论。他们获得了1955年诺贝尔物理学奖。

霍金认为，在黑洞周围，在虚粒子对产生的极短时间内，会出现四种可能性：直接湮灭；双双落入黑洞；正粒子落入黑洞而负粒子逃脱；负粒子落入黑洞而正粒子逃脱。最后一种可能性实现的概率最高。负粒子带有负能量，落入黑洞以后等效于减少了黑洞的能量，而逃脱出来的正粒子等效于从黑洞周围发射出了正能量。于是负粒子落入黑洞而正粒子逃脱的结果等效于从黑洞内部向外界发射出能量，这就是黑洞的蒸发。黑洞蒸发并没有违背视界之内的物质和能量不能逃出视界的基本原则，但蒸发的结果却导致视界内能量减少，同时有能量从视界周围向外界发射。黑洞的质量越大，蒸发越慢，质量为$1M_\odot$的黑洞，一年的蒸发量仅10～20焦耳，可维持寿命10^{67}年。如果黑洞的质量很小，蒸发过程将加快进行，使它们的存在寿命受到威胁。质量为10^{15}克的小黑洞，每秒“蒸发”掉6×10^{9}焦耳的能量，其寿命为100亿年，与恒星的寿命相当。

在霍金理论之前，一般认为黑洞一旦形成就不会再转化为别的什么东西。黑洞的质量只会因吸进外界的物质而增加，绝不会因逃脱物质而减少。黑洞蒸发理论说明黑洞也存在转化的契机。黑洞蒸发的最后结果现在还不能确知。也许未来的量子引力理论能揭开黑洞最后命运的秘密。

10.3.6　旋转黑洞造成的时空漩涡

恒星通常都有自转。在8.1节中介绍过恒星塌缩为中子星时，由角动量守恒原则导致高速转动。但中子星的自转速度不能超过每秒钟1 000转，否则星体会被惯性离心力瓦解。

恒星塌缩成黑洞时，将以更高的速度成为旋转黑洞，即克尔黑洞。一个质量为$3M_\odot$的旋转黑洞，转速可达每秒5 000转，视界上的转动速度接近光速。按照广义相对论，所有大质量的转动物体都要拖曳着周围的时空同它一起转动。理论上，只有在无限远处，时空才是静止的。旋转黑洞产生的这种拖曳效应，将使其所处的时空扭曲，形成巨大的宇宙大漩涡。

水面上的漩涡使其周围的水流呈急速的圆周运动，漩涡中心处的水流则径直落向深深的水底。黑洞周围的宇宙大漩涡也有类似的效应。旋转的克尔黑洞比静止的史瓦西黑洞，在视界外面多出一个临界面，称为静止界面。在静止界面以外的物体，时空拖曳作用很微弱，几乎没有什么影响。进入静止界面的物体，将在时空拖曳作用下，跟随漩涡做圆周运动，越近中心运动速度越快。当进入视界时，就好像落入水面漩涡中心径直沉入水底一样，任何物体都径直落向奇点，再

也不能逃脱出来。

视界与静止界面之间的区域，叫做能层。进入能层的物体将获得很大的能量与角动量，随黑洞一起高速旋转；但由于还在视界之外，所以只是黑洞的半捕获物，既有可能进一步落入视界永远不得逃脱，也有可能在特殊条件下逃出能层。这种逃出能层的物体，因曾随黑洞一起转动而附加了能量，逃出时带走了这部分能量。换言之，进入能层又逃脱出来的物体，提取了黑洞的一部分能量，这是以黑洞的旋转角动量减少为代价换来的。这种有可能从旋转黑洞提取能量的方式称为彭罗斯过程。如果黑洞的全部旋转角动量都被提取完了，黑洞将停止转动，能层消失，只剩下质量和视界，变为静止的史瓦西黑洞，黑洞就“死”了，再也不能直接产生能量了。

10.3.7 黑洞与黑洞之间的碰撞

早期宇宙物质的分布相对集中，彼此之间相隔的距离不远，在各处飘荡着的黑洞很有可能相互遭遇，导致两个具有强大引力场的天体发生猛烈地碰撞，然后合而为一。

也有人推测，在一些星系内部，星系中心的强引力会使邻近的恒星及星际物质更加趋向中心，当汇聚在一起的质量大到一定程度的时候，就会塌缩成黑洞。或者，星系中心区域的一些大质量恒星死亡后塌缩成小黑洞，它们有许多机会相互碰撞而形成更大的黑洞。

对于日常所见的物体，两个小球合并成一个大球，如果密度没有改变，那么大球的表面积一定小于两个小球的表面积之和。但是，由黑洞视界的特性，我们却发现一个与之相反的规律：两个小黑洞经碰撞而融合成一个大黑洞之后，大黑洞的视界面积将大于两个小黑洞的视界面积之和。通过简单的代数运算，这一规律是不难发现的。

以球对称型的史瓦西黑洞为例，黑洞视界的面积 $S=4\pi R_g^2$，R_g 是视界半径。因为

$$R_g=\frac{2GM}{c^2}$$

所以

$$S=\alpha M^2$$

式中，$\alpha=\dfrac{16\pi G^2}{c^4}$。如果两个小黑洞的质量分别是 M_1 和 M_2，形成大黑洞后，质量没有损失，$M=M_1+M_2$，于是大黑洞的面积

$$S=\alpha M^2=\alpha(M_1+M_2)^2=\alpha(M_1^2+M_2^2+2M_1M_2)>\alpha M_1^2+\alpha M_2^2$$

这就证明了上述规律。

按照广义相对论，在两个具有强引力场的黑洞猛烈碰撞的过程中，将有引力

波发射出来。由于能量守恒，引力波的能量是靠两个黑洞的总质量有所损耗而提供的。或者说，发生碰撞时，一部分质量会转化为能量，以引力波的形式发射出去。这样一来，将有 $M<M_1+M_2$ ，但代数运算告诉我们，在一定的数量范围内，即使 $M<M_1+M_2$ ，仍然可以满足 $M^2>M_1^2+M_2^2$ 。按霍金的计算，两个黑洞碰撞时，通过引力波发射能量的形式损失掉的质量即使多达总质量的50%，仍不至于违背上述面积规律：大黑洞的视界面积不小于两个小黑洞的视界面积之和。

黑洞只能吸进物质而不能喷出物质，所以只允许小黑洞合并成大黑洞，不允许大黑洞分裂为小黑洞。所以，宇宙演化的总趋势是所有黑洞的视界面积之和只会增加，不可能减少。用霍金的话来说，在某一空间区域，任意时刻测量所有黑洞的视界面积，并把这些面积加起来得到一个总面积。在过了任意长的时间之后，再作同样的测量，如果没有任何黑洞从这一空间区域的“围墙”内转移出去，所有黑洞视界的总面积不会减少，只会增加。

这样的结论，令人联想到热力学中的重要概念“熵”。著名的热力学第二定律告诉我们：与外界没有任何联系的热力系统，其总熵只会增加，不会减少。整体宇宙没有外界，因此全宇宙的总熵只会增加不会减少。一位年轻的研究生，以色列人贝肯斯坦（J. Bekenstein）曾经向霍金发问：当大量物质投入黑洞时，这些物质携带的熵便从宇宙中消失了，那么宇宙总熵就会减少，岂不违背了热力学第二定律？霍金曾经回答：黑洞是宇宙中很特别的天体，它的存在也许会造成热力学第二定律不再成立的特例。但后来的研究使人们认识到，黑洞视界的面积就是黑洞的熵，它是宇宙总熵的一部分。当物质投入黑洞时，黑洞以外的宇宙总熵是减少了，但黑洞视界的面积却增加了。黑洞的熵增抵消，甚至超过了外界发生的熵减，整体宇宙的总熵并没有减少，甚至有所增加，热力学第二定律依然成立。

黑洞的熵值是非常巨大的。据霍金的计算，一个质量为 $10M_{\odot}$ 的非旋转黑洞，其熵值竟高达 4.6×10^{71} 焦耳/开。根据统计物理学的观点，熵是代表大量的原子或分子无序性增加或减少的一个物理量。无序性增加，熵就增加；有序性增加，熵就减少。黑洞内部只有奇点，没有任何分子或原子，黑洞怎么会有熵呢？正是这些令人难以理解的疑问，促进了黑洞理论的研究工作，发展出诸如黑洞的辐射，量子真空的涨落，及虚粒子对等与热力学紧密联系的黑洞力学新理论。

10.4　黑洞的天文探测

黑洞的数学模型和物理机制理论，早在20世纪30年代就已经接近成熟了，但宇宙中是否真正存在这种天体，并没有引起天文学家的探索兴趣，因为原则上

是不可见的神秘天体，如何能进行探测，实在是很难思议的。自从 1967 年发现脉冲星并被认证为中子星以后，天文学家的热情被激发出来了。理论物理学家预言的恒星的三种归宿，白矮星早已被证实存在，现在中子星又被证实，冲击最后的难关——发现黑洞，给恒星晚期演化问题画上一个圆满句号的任务突兀在天文学家的面前。他们跃跃欲试了。探测不可见的黑洞有两条可供选择的道路：一条是追踪黑洞周围强大的引力场会引起何种效应；另一条是捕捉黑洞吞噬视界以外物质时留下什么痕迹。

根据引力效应发现看不见的天体，史有前例。1834 年白塞耳预知天狼伴星的存在和 1846 年亚当斯（J. C. Adams）、勒维耶（U. J. J. Le Verrier）发现海王星的伟业都已载入史册。这里顺便一提，晚年的勒维耶根据水星近日点进动的异常情况曾经预测：在太阳与水星之间有一个行星，并为之取名为“火神星”。他算准了火神星凌日就在 1877 年 3 月 22 日，这一天，法国几乎所有的望远镜都对准了太阳，准备观测火神星凌日，但凌日却没有出现。半年之后，勒维耶与世长辞，没有见到火神星成为他的临终遗憾。后来人们才知道，火神星是不存在的，水星近日点进动异常不是因为火神星，而是牛顿经典力学理论不够精密造成的。水星近日点进动的准确数据成为广义相对论的重要验证之一。

作为黑洞的候选者，引力效应使天文学家的目光对准五车二附近的御夫座 ε 星，中文名柱一。光谱分析的结果表明，这是一对因引力效应而彼此绕转的食双星，星等变化范围为 $3^{m}.1$～$3^{m}.8$，周期 27 年。主星光度比太阳亮 6 万倍，光谱型 F5，质量为 $35M_{\odot}$。令人瞩目的是看不见的伴星，质量约为 $8M_{\odot}$，如果已经完全丧失了热核反应的能力，它应当塌缩为一个黑洞。可令人难下决断的问题是，在双星绕转的过程中，伴星掩食主星的时间长达 2 年，由此估计这颗伴星外围有一个直径 20 多天文单位的包层，相当于土星轨道大小，充满了低温气体和固体尘埃，包在里面的伴星到底是依然年轻的恒星还是已进入坟墓的黑洞？如果不能进一步证实，柱一也只能说是一个不确定的黑洞候选者。

食双星天琴座 β（中文名渐台二），星等变化范围 $3^{m}.4$～$4^{m}.1$，周期只有 12.9 天，表明两子星靠得很近。从绕转情况推测，看不见的伴星比看得见的主星质量还要大，估计为 $10M_{\odot}$，也有可能是一个黑洞的候选者，但其不确定性比柱一更大。

另一条探测黑洞的道路，由于从 X 射线发射机制中得到的启示，使人信心更足。X 射线是波长为 0.001～10 纳米的电磁辐射，其中 0.001～0.1 纳米段称为硬 X 射线，0.1～10 纳米段称为软 X 射线。X 射线是德国物理学家伦琴（W. C. Röntgen）于 1895 年在偶然中发现的，并因此获得第一届（1901 年）诺贝尔物理学奖。黑洞周围向黑洞下落的物质可达到极高的速度，因而获得很大的动能。在物质进入黑洞视界之前，一部分动能转化为热能，产生数百万度至几亿

度的高温，使电子以极高的速度闯入原子核，在核电场中受阻而产生X射线。发出X射线的天体不一定是黑洞，但黑洞周围如果有物质被吸入视界，就一定会发出X射线。如果黑洞是双星系统的一个成员，与同伴又靠得很近，黑洞便有机会不断窃取同伴的物质，而产生大量的X射线辐射。因此，探测发出X射线的双星系统成为寻找黑洞的重要线索。虽然X射线不是从黑洞视界内部发出的，但发出强劲X射线的地方，表明那里很可能有黑洞存在。

X射线光子能量比光学波段的光子能量大得多。玻璃镜面能使可见光光子反射或折射而聚焦，但对X射线光子却无能为力。天文学家要用特殊的探测器才能捕捉X射线的光子并对其计数。地球大气层完全屏蔽X射线，所以X射线探测器必须送到外层空间才能进行观测。天上的第一个X射线源是1962年7月由美国高空火箭在225千米高空发现的，称为天蝎座X-1。1970年12月12日是肯尼亚独立7周年，在首都内罗毕万人欢呼"乌呼鲁"（uhuru，斯瓦希里语的音译，意为"自由"）的同时，美国NASA在肯尼亚东海岸的印度洋上发射了一个X射线探测卫星，名字就叫乌呼鲁。到1973年春天，乌呼鲁卫星电源耗尽停止工作。在2年多的运行时间里共发现了339个X射线源。1978年11月美国发射了爱因斯坦卫星，1990年法俄发射了SIGMA/GRANAT卫星，德、美、英发射了ROSAT卫星，1999年美国发射了钱德拉CXRO卫星，欧洲发射了牛顿XMM卫星，都对宇宙中的X射线探测作出了重要贡献，共找到15万个X射线源。意大利裔美国天文学家贾可尼（R. Giacconi）因为在X射线探测方面的开拓性工作而获得2002年诺贝尔物理学奖。

人们为寻找黑洞付出了很大的努力，但成果却寥寥无几。20世纪70年代一共找到4个黑洞，被戏称为"黑洞四人帮"。其中之一是天鹅X-1，它是1965年被高空X射线探测火箭首次发现的，后来也被乌呼鲁卫星观测到。1971年3月和4月，乌呼鲁卫星记录到它的X射线光度有快速变化，同时发现它也是一个射电源。用射电望远镜精密定位的结果，它的位置与一颗光学可见的恒星相对应，这颗恒星的编号是HDE226868。这颗恒星视亮度为9等，光谱型为O型，是一颗高温蓝色超巨星，半径约为太阳的一百倍，质量在25～40$M_\odot$，距离太阳约8 000光年。光谱分析表明它是双星系统中的一员。在这颗蓝色巨星附近有一颗看不见的伴星，不断窃取它的物质，并加热到1 000万开的温度，从而成为强大的X射线源。蓝色巨星和看不见的伴星之间只有3 000万千米的距离，绕转周期5.6天，X射线发射区范围只有1 000千米。不可见伴星的质量经反复测定，估计为10～15$M_\odot$，远远超过了奥本海默极限，因此初步断定为黑洞。这是第一个被发现的，也是具有最大可信度的恒星级黑洞（图10.4.1；光盘图10.4.2天鹅座X1黑洞示意图）。

除天鹅座X-1，还有3个X射线源，即LMCX-1、LMCX-3和A0620-00，

也被测定为可能具有质量在 $3M_{\odot}$ 以上的不可见伴星。LMCX-1 和 LMCX-3 是银河系的近邻大麦哲伦星系中的两个 X 射线源，也是同天鹅座 X-1 一样的高温蓝色巨星，由其光谱型估计质量在 $4\sim8M_{\odot}$，不可见伴星的质量在 $4\sim11M_{\odot}$。A0620-00 也被称为麒麟座 V616，是银河系内的小质量双星 X 射线源，距离太阳约 3 000 光年。

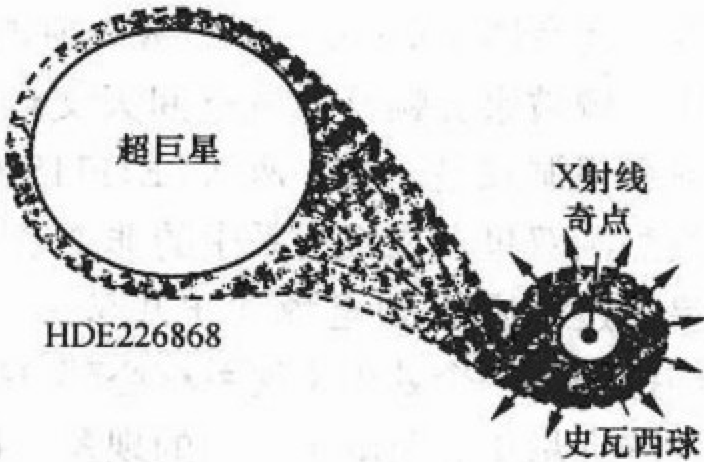


图 10.4.1 恒星级黑洞——天鹅座 X-1

A0620-00 的光学伴星是一个质量为 $0.7M_{\odot}$ 的非致密矮星，不可见伴星的质量大到 $3.3\sim4.2M_{\odot}$，绕转周期 7.75 小时。

20 世纪 90 年代，又发现 6 对新的 X 射线双星黑洞候选者。其中天鹅座 V404 是从测定视向速度的变化而推知其旋转轨道的情况，再用力学方法求得双子星的质量而判定其一为黑洞的。天蝎座 J1655-40，1994 年据康普顿 γ 射线空间天文台的观测，被认为有一个看不见的伴星是黑洞，并且测到了黑洞掩食亮伴星的情况，因而是一例相当可信的黑洞候选者（光盘图 10.4.3 天蝎座 J1655-40 黑洞示意图）。表 10.4.1 列出了上述 10 对 X 射线双星黑洞候选者的相关数据，其中 2 个在大麦哲伦星云里，8 个在银河系内。

表 10.4.1 10 对 X 射线双星黑洞候选者

名 称	星 等	光谱型	距离/万光年	轨道周期/日	不可见伴星的质量/$M_{\odot}$
天鹅座 X-1	9	O	0.8	5.6	10～15
LMCX-3	17	B	17.5	1.7	4～11
LMCX-1	14	O	17.5	4.2	4～10
麒麟座 V616	18	K	0.3	0.32	3.3～4.2
天鹅座 V404	18	K	1.1	6.47	8～15.5
苍蝇座 GS1124-683	20	K	1.0	0.43	4～6
蛇夫座 H1705-250	21	K	1.0	0.70	>4.1
英仙座 J0422+32	22	M	0.8	0.21	4.5
天蝎座 J1655-40	17	F-G	1.0	2.61	4～5.2
狐狸座 GS2000+25	22	K	0.8	0.34	5.3～8.2

5.6.2 小节中介绍过 SS433 可能是黑洞双星（光盘图 10.4.4 天鹰 SS433 X 射线图像及示意图）。2000 年发现类似的一对 XTEJ1500-564，位于矩尺座，距离 1.7 万光年（光盘图 10.4.5 矩尺 XTEJ1500-564 黑洞示意图）。同年还发现天鹅座 X-3 射电双星之一是沃尔夫-拉叶星，另一颗可能是黑洞，距离 3.2 万光年。光盘图 10.4.6 是美国国家射电天文台拍摄的天鹅座 X-3 射电强度变化的情

况（光盘图 10.4.6　天鹅 X-3 射电图像变化图）。盾牌座 LS5039，距离 1 万光年，曾被康普顿 γ 射电空间天文台发现为 γ 射线源，后被证明是一对大质量 X 射线黑洞双星。大熊座 XTEJ1118+480，距离 5 000 光年，也很可能是一对 X 射线黑洞双星。在银河系中的非 X 射线双星中，被认为存在黑洞的天体还有超新星遗迹仙后 A 射电源（详见 5.6.3 小节）。SIGMA/GRANAT 硬 X 射线卫星曾经探测到一个处于银河系核心部分明亮的 X 和 γ 射线源 IE1704.7-2942，出现过一阵大量正、负电子湮灭的现象。按照高能天体物理学家的观点，这种现象只有在黑洞周围才可能发生，因此该射线源也应算是一个黑洞的候选者。

有人估计，在过去 100 亿年中银河系里平均每 100 年有一颗超新星爆发，而每 100 颗超新星中有一颗导致黑洞形成，那么银河系里就应该有 100 万个恒星级黑洞。可是在 X 射线双星系统中迄今找到的只有表 10.4.1 所列 10 个加上刚刚介绍的 7 个，一共区区 17 个候选者，而且 2 个还不在银河系内，似乎颇令人失望，也反映了黑洞探测的困难程度。

10.5　巨型黑洞、微型黑洞和中等质量黑洞

前面几节讨论的是由一颗大质量恒星塌缩而成的恒星级黑洞的情况。从更广的方面说，黑洞的数学模型并没有限制黑洞的质量和尺度大小。由恒星塌缩而成的黑洞质量一般为几个 $M_\odot$，视界半径为数公里。但也允许有质量大到数十亿个 $M_\odot$，尺度像整个太阳系那么大的巨型黑洞，以及质量相当于一座山（10^9 吨）而尺度只有质子大小（10^{-15} 米）的微型黑洞。甚至黑洞并不一定是极高密度的天体。黑洞最主要的特征是极高的致密度而不是密度。致密度与密度是不同的概念。密度是质量与体积之比，而致密度是引力半径与实际半径之比，也叫引力参数。引力参数越接近于 1，就越接近黑洞状态。表 10.5.1 给出了一些物体的引力参数值。黑洞的密度与质量的平方成反比，质量越小，密度越大。恒星级黑洞（质量 $3M_\odot$）的密度达 2×10^{15} 克/厘米^3，而星系级的巨型黑洞（质量 $10^8M_\odot$），密度和水相差无几。

表 10.5.1　不同物体的引力参数

物　体	质　量	尺度 R	史瓦西半径 R_g	密度 g/厘米^3	引力参数 R_g/R
原子	10^{-26} 千克	10^{-8} 厘米	10^{-51} 厘米	10	10^{-43}
人体	100 千克	1 米	10^{-23} 厘米	1	10^{-25}
山	10^{12} 千克	1 千米	10^{-13} 厘米	6	10^{-18}
地球	10^{25} 千克	10^4 千米	1 厘米	5	10^{-9}

续表

物 体	质 量	尺度 R	史瓦西半径 R_g	密度 g/厘米^3	引力参数 R_g/R
太阳	10^{30}千克	10^6 千米	1 千米	1.4	10^{-6}
白矮星	$1M_\odot$	10^4 千米	1 千米	10^6	10^{-4}
中子星	$1M_\odot$	10 千米	1 千米	10^{15}	10^{-1}
星系	$10^{11}M_\odot$	10^5 光年	10^{-2}光年	10^{-25}	10^{-7}
宇宙	$10^{23}M_\odot$	10^{10}光年	10^{10}光年	?	1(?)

近年来关于银河系核心存在巨型黑洞的猜测越来越得到支持。银河系核心在人马座方向，那里是全天空中最强的射电源之一——人马座 A，兼有热辐射和同步加速辐射两种特征（参见 6.5 节）。银心发出的可见光波段的光子被大量的气体和尘埃云所遮掩，只有千亿分之一能到达地球；而近红外辐射约十分之一能够到达。人们通过射电波、红外、X 射线和 γ 射线来了解银心。

1983 年发射的红外天文卫星（IRAS）对位于银河系中心一个编号为 IRS16 的强红外辐射源做了进一步观测，推测出在距核心半径为 5 光年的范围内分布着 200 万颗恒星，恒星密度比球状星团高 1 000 倍。还发现区内有大量浓密的温度约为 300 开的“暖”云。暖云和恒星都在高速运动。估计区内总质量在 500 万到 800 万倍太阳质量之间，而恒星总质量只有 200 万倍太阳质量，暖云的质量也不会太大。一定有巨大的质量属于看不见的天体，人们自然想到，那是银心处的巨型黑洞。光盘图 10.5.1 是钱德拉空间望远镜拍摄的银核区 65 光年×65 光年 X 射线图像，巨型黑洞就隐藏在中央白色亮斑中（光盘图 10.5.1 银核区 65 光年×65 光年 X 射线图像）。光盘图 10.5.2 是欧洲南方天文台 VLT 拍摄的银核区 2 光年×2 光年红外图像，箭头指处即人马 A * 位置（光盘图 10.5.2 银核区 2 光年×2 光年红外图像）。在核心处 1 光年范围内，有数千颗恒星。由这些恒星运动的情况推测，有 300 万倍太阳质量拥挤在 10 个“光日”（相当于 30 倍海王星轨道直径）范围中。其中一颗叫做 S2 的恒星，距离人马 A * 中心点 17 “光时”（相当于 4 倍海王星到太阳的距离），运动速度 5 000 千米/秒，周期 15.2 年，轨道偏心率 0.87。根据这些数据可以计算出人马 A * 中心处的巨型黑洞，质量为 260 万太阳质量，视界半径 760 万千米，比太阳大 11 倍。大约每过 1 万年，就有一颗恒星被它的引潮力撕碎，一部分碎片被吞吃，另一部分形成气体云分散在很扁的轨道上围绕黑洞快速旋转。这就是 IRAS 卫星“看到”的那些暖云。

银河系属正常星系，即使活动也是较平稳的。与那些遥远的活动星系和类星体相比较，银河系中心的人马座 A * 黑洞就相形见绌了。活动星系核的光度通常在 10^{11}～10^{15}，由光度可推算其质量的下限。这个下限在天文上称作“爱丁顿临界值”。其含义为：一个稳定的辐射源，由质量造成的引力不能小于其辐

射所具有的外向压力，否则引力不足以维持自身物质的聚集而会被“吹”散。活动星系核的高光度说明它们具有很大的质量，应在100万～100亿$M_{\odot}$，否则与巨大光度相当的压力就会把所有物质吹散。活动最激烈的星系核当属类星体，它也应当具有最大的质量。从活动星系核和类星体的光变周期，可见它们只有很小的尺度。质量和尺度的配比，说明在活动星系核，特别是类星体核心有巨型黑洞存在。当然星系核心的黑洞与恒星级黑洞在演化上有巨大的差别。前者是宇宙创生后的极早时期形成的，而恒星级黑洞是恒星演化到晚期死亡以后的产物。

室女座星系团的中心椭圆星系M87，核心处有一个30亿倍太阳质量的巨型黑洞，发出炽热的气体喷流光盘图6.7.24已经显示了M87喷流的射电图像。光盘图10.5.3更给出了M87喷流的哈勃望远镜图像和美国甚长基线阵VLBA喷流中心0.1光年范围图像（光盘图10.5.3　M87喷流中心射电图像）。鲸鱼座旋涡星系M77，距离5 000万光年，中心有500万倍太阳质量的巨型黑洞，钱德拉和斯必泽空间望远镜的合成图像，显示出从黑洞中吹出来的高速恒星风（光盘图10.5.4　鲸鱼座M77黑洞中吹出高速星风）。狐狸座椭圆星系NGC7052，距离1.9亿光年，有吸积盘和3亿倍太阳质量黑洞，（光盘图10.5.5　狐狸座NGC7052有黑洞吸积盘）。鹿豹座MS0735.6＋7421星系团，距离26亿光年，中央黑洞达1万亿倍太阳质量，比银河系总质量还大。光盘图10.5.6是钱德拉空间望远镜2005年1月公布的图片（光盘图10.5.6　鹿豹座MS0735.6＋7421星系团X图像；光盘图10.5.7　MS0735.6＋7421钱德拉与哈勃的图像；光盘图10.5.8　MS0735.6＋7421光学、X与射电的合成图像），后者公布于2006年11月。室女座星系SDSSPJ1306，距离130亿光年，中央黑洞有10亿倍太阳质量（光盘图10.5.9　室女座星系SDSSPJ1306黑洞示意图）：星系外围有晕和黑洞造成的吸积盘，更外围有环状结构。右下是钱德拉空间望远镜拍摄的X图像。蛇夫座星系NGC6240，距离4亿光年，中心有两个巨型黑洞（光盘图10.5.10　蛇夫座NGC6240的光学图像；光盘图10.5.11　蛇夫座NGC6240的X图像）。光盘图6.7.3是半人马A的光学、X和射电综合图像。但光盘图10.5.12展示的斯必泽太空望远镜拍摄的半人马A红外图像（光盘图10.5.12　半人马A红外图像），则别有一番风景：棕色旋涡星系镶嵌在外围蓝色的椭圆星系中，旋涡星系中央显出奇特的平行四边形亮环和暗区，暗区中心有巨型黑洞正在美餐，分外明亮。

黑洞也可能普遍存在于正常星系的核心。在这些星系的中心部分恒星的密集分布和运动速度也反映着核心是否有特大质量集聚的情况，如果质量大到一定程度，而集中的范围又很小，很可能黑洞就在那里。根据对一些邻近星系表面亮度和恒星速度分布的精确观测，已有一批正常星系被认为可能存在巨型中心黑洞。

表 10.5.2 给出了这些星系的名称和核心质量。

表 10.5.2 存在巨型黑洞的正常星系

名称	黑洞质量/$M_\odot$	名称	黑洞质量/$M_\odot$
银河系	2.6×10^{6}	M106	4×10^{7}
M31	3×10^{7}	NGC3115	1×10^{9}
M32	2×10^{6}	NGC3377	8×10^{7}
M104	5×10^{8}	NGC4261	5×10^{8}
M105	6×10^{7}	NGC4486B	6×10^{8}

微型黑洞也叫原初黑洞，可能形成于宇宙大爆炸的早期，典型质量和尺度分别为 10^{15}克和 10^{-15}米，这大致相当于全世界所有人口的体重之和的两倍与一个质子的直径。现在还没有任何方法来对之进行探测。微型黑洞的概念是霍金提出来的，他认为远在恒星和星系形成之前，初始宇宙的压力和能量是如此之大，足以迫使一些物质小团块收缩成为不同尺度和质量的原初黑洞。这时候，宇宙由于大爆炸的力量正在膨胀，同时又由于能量的微小涨落，激发一部分物质在自身引力作用下聚集成团块。原始宇宙中的某些区域与整体膨胀的趋势相反，形成局部的密度反差，逐渐产生出星系、恒星、星云这些物质相对集中的天体，同时也有质量比恒星小很多的团块凝聚成微型黑洞，飘浮在茫茫宇宙之中。按霍金提出的黑洞蒸发理论，质量越小的黑洞蒸发速度越快。质量为 1 吨的微型黑洞会在 10^{-10}秒内蒸发完，质量为 100 万吨的黑洞则能维持 10 年的寿命。只有那些寿命与宇宙年龄相当的微型黑洞才能维持到今天，它们的质量应在 10 亿吨（10^{15}克）以上，而其半径只比质子半径大不了多少。霍金还认为，伴随着黑洞蒸发，黑洞的视界将因收缩而升温，蒸发也越来越快。当微型黑洞蒸发到最后，只剩下 0.1 秒的时间时，将发生猛烈的爆炸，黑洞被摧毁，全部质量转化为能量，以高强度 γ 射线暴的形式喷发出来。

关于微型黑洞的奇妙行踪，有人想到了 1908 年 6 月 30 日的通古斯科事件。那里是俄罗斯西伯利亚叶尼塞河的无人区。那天早晨，突然遭到一个自天而降的物体的袭击。爆炸产生的声、光和冲击波摧毁了大片森林，杀死了 1 500 多头驯鹿，1 000 千米以外的居民都听到了声响，房屋晃动，窗户玻璃碎落。按地震仪器的记录，爆炸威力相当于 500 颗扔在广岛的原子弹。事件发生 20 年后，才对爆炸的地方作科学考察，半径 15 千米以内的树木被烧焦，30 千米以内的树木被拔起，由中心向外倒伏，但是没有找到散落物。很多人猜测这次事件是由彗星或小行星撞击地球造成的，只是没有撞击到地球表面，而是在空中发生了爆炸。究竟如何，还没有确凿的证据。两位美国天体物理学家提出，那可能是一次微型黑

洞与地球遭遇而发生的事件。微型黑洞从通古斯科穿过地球，又从另一侧南大西洋穿出去。这种解释的可信度甚低，但具有不胫而走的传奇色彩。更有人指出，如果小黑洞钻进地球而没有穿出去，它留在地球的肚子里，会因引潮力而瓦解周围的物质，并吞噬进黑洞的视界，虽然开始时黑洞质量很小，但天长日久，它的胃口越来越大，最终将会吞下整个地球。要真是这样，我们这颗行星就难逃厄运了。

近十几年来，人类所知的黑洞家族又增加一个新品种——中等质量黑洞，质量介于恒星级黑洞与巨型黑洞之间，存在于球状星团的中心。例如在仙女座星系M31中的球状星团G1中心区，就有一个约2万倍太阳质量的黑洞。位于飞马座的球状星团M15中也发现有4 000倍太阳质量的黑洞，距离我们3万光年。在光盘图6.5.4中有G1和M15在星座中的位置图。光盘图5.5.23显示过M31中的球状星团G1的图像；光盘图10.5.13则显示了飞马座球状星团M15的图像（光盘图10.5.13　飞马座球状星团）。光盘图10.5.14示意了发现星团中心存在黑洞的观测依据（光盘图10.5.14　星团中心存在黑洞的观测依据），上半幅图示意M15中心区一些恒星的谱线红移，一些恒星的谱线紫移，它们在黑洞引力作用下高速运转；下半幅图示意G1中心有很多恒星高速运转，它们的谱线红移、紫移混杂在一起，使谱线变宽、变模糊。2008年通过哈勃望远镜和南双子望远镜的观测，发现在半人马座ω球状星团中心存在有4万倍太阳质量的黑洞。光盘图10.5.15是中等质量黑洞与星系级质量黑洞大小比较示意图（光盘图10.5.15　黑洞质量大小的比较）。

10.6　活动星系核和类星体的能源机制

活动星系核（active galactic nucleus，AGN）是在6.7节已介绍过的那些活动星系的核心，也包括类星体这样的特殊天体。这方面的研究是当代天体物理学中最活跃的热门领域之一。

与正常星系相比，活动星系核主要有以下观测特征：

（1）有一个致密的核区，尺度远小于正常星系，而光度远大于正常星系。

（2）在射电、光学、X射线、γ射线等所有波段都有强劲的辐射，包括超额的红外和紫外辐射，而正常星系的辐射主要是在可见光波段。

（3）光谱为连续谱，有亮而宽的原子和离子的发射线。

（4）连续谱和发射线的强度和谱型都有较短时标的变化。

活动星系核强大的辐射能量不可能像正常星系那样主要来自恒星的热核反应。在氢-氦热核反应过程中，质能转换效率只有0.7%（每消耗1 000克氢，产生出与7克物质相当的能量）。活动星系核的光度达到太阳光度的$10^{11}\sim10^{15}$倍，

质量为 100 万～100 亿 $M_{\odot}$。如果其产能机制来自热核反应，那么只消几百万年，全部可产能的质量就都被高光度消耗完了，这与星系的实际寿命相差太远。可见在活动星系核中，能量产出的效率应当高得多。

在对 X 射线双星吸积过程的研究中，已经看到了效率较高的质能转换情况。当恒星级黑洞周围的吸积盘中有 1 000 克物质沿螺旋线落入黑洞时，可辐射出与 100 克物质相当的能量，效率达到 10%。对于 10 亿 $M_{\odot}$ 的巨型黑洞，在转动较快的情况下，被吞噬的恒星和气体，也沿螺旋线进入黑洞，质能转换的效率可达 40%。

现代天体物理理论认为，能解释活动星系核以及类星体的产能机制的是黑洞—吸积盘—喷流模型：中央有一个快速旋转的巨型黑洞，它大量吸积周围破碎了的恒星和星际物质，在时空拖曳效应作用下，在能层中快速旋转，在视界外围形成一个吸积盘，沿盘面的垂直方向有两股强大的喷流。吸积盘内侧的物质被巨型黑洞吞噬时，引力势能被释放出来转换为强大的辐射能。（光盘图 10.6.1　类星体的统一模型）

一个自由落体从高空砸到地面上，撞击时释放出来的能量就是由落体在高处时地球的引力势能转换而来的。引力势能的大小取决于落体的质量、离地面（或地心）的高度和地球引力场的强度。一颗小球从飞机上坠落地面（假如不计空气阻力），除了使小球和地面都受到破坏（机械形变）之外，还会释放出红外辐射（热量）。如果同样的小球从同样高度坠落到白矮星的表面，则释放的引力势能会大得多，将发出可见光和紫外线辐射；如果坠落到中子星表面，发出的将是 X 射线辐射，释放出的引力势能相当于爆炸了一颗原子弹。因为白矮星和中子星的引力场比地球强大得多，而且星体半径极小，从星体中心起算的同样高处，距离星体表面更远，引力加速的时间更长，落地时的速度更快。自由落体到达中子星表面时，速度将达到 10 万千米/秒。巨型黑洞因吸积而释放出来的引力势能当然就更加强大了。

在黑洞吸积物质的过程中，由于旋转角动量的存在，吸积物不会呈均匀的球状分布，而是集中在一个扁平的盘状区域内，称为吸积盘。吸积物的来源是被黑洞引潮力撕碎的恒星和星际气体。如果恒星不被撕碎而是被黑洞整吞进去，那么就不会有能量的释放，只是使黑洞的质量有一点点的增加而已。对于质量大于 $3\times10^{8}M_{\odot}$ 的黑洞，引潮力的洛希半径小于引力半径，恒星在还未被引潮力撕碎之前就已进入视界被黑洞整吞下去了。所以一般认为：质量较小的活动星系核如塞佛特星系，靠引潮力撕碎恒星形成吸积盘；质量更大的如类星体，撕碎恒星的不是引潮力而是恒星乃至星系之间的碰撞。

在银河系的太阳附近，恒星碰撞的可能性几乎为零；但在庞大星系的核心区域，恒星密集，运动速度很大，碰撞是常有的事。据计算，星系中心如果有一个

10亿$M_{\odot}$的黑洞，那么在距离黑洞10光年的范围内，每年将发生10次以上的恒星碰撞事件。如果两个星系互相遭遇、互相吞食，恒星碰撞的机率将更高。碰撞的猛烈作用使恒星解体，成为中心黑洞的“食物”，先进入吸积盘，后落入黑洞，转换为巨大的能量。

活动星系核靠巨型黑洞“吞食”而产能的机制，从而能够维持辐射的前提之一，是有足够多的“食物”。贪婪的黑洞吃得越多，胃口就越大，一旦把附近的恒星和气体都吃光了，就会因无物可食而熄灭。类星体具有最大的辐射强度，因而有最大规模的黑洞—吸积效应，食量也就最大。哈勃空间望远镜观测到的有基底星系的类星体，3/4的基底星系有与其他星系碰撞或正在吞并的现象，为中心黑洞提供了充足的食物。在已发现的类星体的基底星系中，氢没有大量电离，说明这些类星体的寿命短于1亿年（尽管它们实际上在距今100亿年之前就已经诞生了），否则氢早就大量电离了。类星体被发现的数量只占星系总数的500万分之一，也说明类星体只有较短的存活寿命。类星体是星系演化过程中一个特殊阶段所表现出来的行为。大多数星系早已度过了这一阶段，其中的类星体早已“死”掉了。

观测数据表明类星体的红移分布在$z=2$附近较为集中，红移量更大或更小的类星体数量越来越少。从红移的宇宙学性质和哈勃关系来理解，这意味着在宇宙的某个年龄阶段（取哈勃常数为71，$z=2$相应的时标为距今110亿年之前，即宇宙年龄为27亿岁时），类星体数量很多，更早或更晚的时期逐渐减少。在宇宙诞生之初，类星体数量凤毛麟角，而现代早已绝迹。如同生物进化过程中，恐龙家族的兴衰对应于某个地质年代一样，类星体在宇宙诞生27亿年前后最为兴旺发达。宇宙10亿岁时还没有类星体，到距今20亿年之前，类星体已经灭绝了。这种情况可以从类星体的能源机制得到说明。在宇宙刚诞生时，星系还没有形成，当然不会有类星体。星系形成之初，中央区域还来不及凝聚成巨型黑洞，吸积无从发生，也不会有类星体那样的高光度表现。当宇宙27亿岁时，巨型黑洞崭露头角，这时的宇宙还没有膨胀得太远，星系相当密集，碰撞的机会很多，有大量的食物供巨型黑洞享用，类星体频频出现。随着时间的推移，星系之间以及星系内部恒星之间的距离逐渐拉开，巨型黑洞的食量增加，食物来源反而减少，类星体逐渐衰亡。直到宇宙120亿岁时，类星体就灭绝了。其他类型的活动星系核，它们的距离和年龄分布，也都可用上述能源机制加以解释。

活动星系核的喷流是从对射电星系双瓣结构的研究中被发现的。有关情况在6.7节中有过介绍。在黑洞—吸积盘—喷流模型的研究中，天文学家进一步认识到喷流是所有活动星系核所共有的现象。喷流物质是高度电离的等离子体气体，从快速转动的吸积盘中，沿垂直盘面的方向双侧喷出，流速接近光速。实际观测到的喷流有的是双向对称形式，有的只有单向或强弱不对称。根据距离推算出来

的喷流速度有的竟然超过光速好几倍。这些现象的解释归结为喷流的实际空间走向与观察者的视线方向夹角不同造成的。如果喷流方向与视线垂直，夹角为 90°，则看到双向对称喷流；如果夹角较小，一支喷流远离而去，另一支迎面而来，强弱会出现明显的差别。由于实际喷流速度接近光速，按照狭义相对论，朝向地球的这支喷流不仅光度会被放大，观测到的流速也被放大，在某个特殊夹角上，会看到流速大大超过光速的现象。这是速度被放大造成的假象，而不是实际的超光速，称为视超光速现象。

喷流产生的机制目前还没有很好的解释方式。一种理论认为，由于黑洞周围存在强磁场，位于黑洞能层中的吸积盘高速转动时，不断切割磁力线产生感应电流，使带电粒子不断离开能层，提取了黑洞的旋转角动量（即 10.3.6 小节介绍过的彭罗斯过程）而形成喷流。这种机制被称为“黑洞发电机”机制。

黑洞—吸积盘—喷流模型是当前天体物理学家们比较认可的所有活动星系核，包括类星体在内的统一模型（光盘图 10.6.1）。在这个模型里，有 3 个基本参数，即黑洞质量、黑洞的转动角动量和吸积率。黑洞显然是主体，它因高速自转而保有巨大的角动量，周围还得有足够多的食物以维持较高的吸积率。3 个条件具备才形成了具有强大活力的活动着的星系核心。最明亮的活动星系核是类星体。类星体与黑洞之间强烈的反差令人深感诧异：黑洞本身是绝对黑暗的，但若配备上一定的条件，就变成了宇宙中最明亮的天体。这一模型中的真实物理过程以及它们如何随时间演化，仍然存在一些尚不能确切回答的问题。

美国《科学》杂志 2007 年十大科技成果之一是观测到来自活动星系核的高能宇宙线。有来自 17 个国家的科学家在美国比埃尔奥格（Pierre Auger）高能宇宙线天文台设在北美科罗拉多和南美阿根廷门多萨（Mendoza）的观测站，接收到 2.5 亿光年范围内 472 个活动星系核的高能宇宙线，这些宇宙线可能是活动星系核的中心巨型黑洞在吞吃食物的过程中发出的。

10.7 宇宙深处的 γ 射线暴

γ 射线暴（GRB）是一种短时间内高能 γ 射线爆发现象。1963 年美国和苏联签订了禁止地面核试验条约。为了监视条约的执行，美国发射了一系列取名为维拉（Vela）的军事卫星，其监视方法就是探测由地面核试验产生的 γ 射线暴。1967 年果然监测到一场 γ 射线暴，美国军方顿时哗然。但最终查明，它不是来自地面核试验，而是来自天上的某个天体。从此天文学家开始了对 γ 射线暴的研究，陆续发现了一批 γ 射线暴。开始遇到的一个关键问题是 γ 射线暴源头的距离，它究竟是远在天边呢还是近在眼前？如果 γ 射线暴只在太阳系附近，那么所有观测到的 γ 射线暴释放的能量仅约 10^{19} 焦耳，抵不上一次中等水平的太阳耀

斑。如果γ射线暴发生在遥远的河外星系中，它在很短时间内爆发的能量会同超新星同数量级甚至更高。在1990年的一次国际学术会议上，人们倾向于认为γ射线暴是中子星的特殊表现，发生在银河系范围之内。

1991年，美国发射了康普顿γ射线空间天文台（CGRO），短时间内即发现了800多起γ射线暴。统计表明，γ射线暴的空间分布是高度各向同性的（光盘图10.7.1　2704起γ射线暴分布图）。这使人想到，它们不是来自银河系内的天体，因为银河系是盘状的，太阳在盘子的靠边位置上，河内天体的数量分布不会是各向同性的。如果γ射线暴位于更加遥远的河外宇宙空间，各向同性的分布就是很自然的了。但仍有人坚持γ射线暴是银河系内的事件，是从银盘逃到银晕中去的中子星所为。γ射线暴距离之争空前激烈。

γ射线稍纵即逝，探测器定位精度不高，无法判断在发生γ射线暴的几度范围内成千上万个天体中，哪一个是它的源头。1996年4月，意大利、荷兰联合发射了Beppo SAX卫星，可以同时监测γ射线暴和X射线发射。由于X射线余辉能持续一两个星期，可以准确定位。1997年2月28日，Beppo SAX卫星观测到位于猎户座内的一起γ射线暴，持续时间80秒，取名为GRB970228。8小时后，该卫星又在同一位置观测到X射线余辉，别的空间探测器也观测到了。21小时后，西班牙拉帕尔玛岛上的口径4.2米光学望远镜看到了它的光学余辉，亮度21等。半年之后，哈勃空间望远镜看到它已减弱到28等。（光盘图10.7.2　GRB970228及其X射线余辉）左图2月28日所拍，γ射线正在爆发；右图3月3日所拍，只剩X射线余辉。图中的网格线指示位置；颜色指示光子能量：红色、白色是γ射线，绿色是X射线。光盘图10.7.3是哈勃空间望远镜拍到的光学余辉（光盘图10.7.3　GRB970228的光学余辉）。4月2日，Beppo SAX观测到又一起γ射线暴GRB970402，位于南三角座，7小时后，观测到X射线余辉（光盘图10.7.4　GRB970402及其X射线余辉）。5月8日，Beppo SAX卫星在鹿豹座内观测到一起γ射线暴GRB970508，持续时间15秒（光盘图10.7.5　GRB970508）。5小时后观测到X射线余辉，两天以后，地面5米望远镜观测到亮至20等的光学余辉（光盘图10.7.6　美国5米望远镜拍到GRB970508的光学余辉）。甚长基线干涉仪观测到它的射电余辉，定位精度达0″.001。一年以后，哈勃空间望远镜还能观测到它（光盘图10.7.7　哈勃空间望远镜拍到GRB970508的光学余辉）。从光学余辉的光谱测出其红移量为$z=0.835$，按宇宙学红移推算，这起γ射线暴的发生地距离我们74亿光年（取哈勃常数$H_0=71$）。12月14日，Beppo SAX和CGRO同时观测到又一起强γ射线暴GRB971214，位于大熊座内，持续时间50秒。7小时后，观测到X射线余辉（光盘图10.7.8　GRB971214及其X射线余辉）。夏威夷的凯克Ⅱ及另外一些光学望远镜都观测到它的光学余辉，还发现所在精确位置的基底星系，是一个典型

的星暴星系，亮度25.6等，红移量$z=3.418$，相应的距离为124亿光年。这起γ射线暴事件，居然是在宇宙年龄13亿岁时发生的。它在50秒钟内倾泻出来的能量高达10^{46}焦耳，相当于整个银河系200年的辐射总能量。在头一两秒钟内，它的亮度居然与整个宇宙的其余部分一样亮（光盘图10.7.9 GRB971214的光学余辉）。左图凯克Ⅱ望远镜所拍、右图哈勃望远镜所拍。1997年这几起γ射线暴的观测成果，被列为美国《科学》周刊年终十大科技成果之一。

1999年1月23日，CGRO观测到一起更强的γ射线暴GRB990123，持续时间约100秒。与前几起不同的是，它的光学余辉在爆发后22秒钟就出现了，47秒时达到最亮，星等8.95等，红移量$z=1.6$，距离102亿光年。6小时后观测到X射线余辉，次日观测到射电余辉。GRB990123的能量高达3.4×10^{47}焦耳，看起来比9等星还亮。人们猜想这不是它的真实亮度，而是引力透镜的增亮作用，或者其光辐射不是各向同性而是集中成束发射，地球碰巧位于射束所在的方向，否则如此高的亮度是难以理解的（光盘图10.7.10 哈勃望远镜所拍GRB990123的光学余辉）这起γ射线暴的发现被列入1999年美国《科学》周刊10大科技成果之一。

自1967年第一例γ射线暴被发现以来，至1999年末已观测到近3 000次γ射线暴。现在差不多每天都能观测到1～2次。γ射线暴来自宇宙尺度上的遥远天体，有极高的能量集中于很小的体积内，在很短的时间内，以一种效率极高的方式大规模释放能量，而且广泛分布在宇宙各处，明灭可睹。人们曾经认为超新星是除宇宙大爆炸以外最猛烈的爆发事件；现在看来，有些γ射线暴的猛烈程度超过了超新星。关于γ射线暴的物理本质及能源机制，是当今天体物理学中最富神秘色彩的问题之一。

1998年4月25日，与γ射线暴GRB980425几乎同时，在同一位置上出现一颗超新星，天文学家当即意识到这不是偶然的巧合。2002年8月13日人马座γ射线暴GRB020813，同时出现高能粒子喷流，与同一位置出现的超新星爆发相隔60多天，进一步显示出γ射线暴与超新星的关联（光盘图10.7.11 GRB020813示意图）。2003年3月29日再度特别清楚地表明，γ射线暴GRB030329确实是由超新星爆发引起的。GRB030329位于狮子座，红移量0.168，距离21亿光年。相应的超新星SN2003dh属于Ic型超新星，比其他类型的超新星爆发更加强烈。它的观测结果成为美国《科学》周刊2003年十大科技成果之一，这已是γ射线暴第三次榜上有名（光盘图10.7.12 GRB030329的光学余辉，南美6.5米麦哲伦望远镜拍摄；光盘图10.7.13 GRB030329的光学余辉，南美8.2米欧南台望远镜拍摄；光盘图10.7.14 GRB030329的射电余辉，美国110米、德国100米、美国VLA和VLBA综合拍摄）。2004年元旦钱德拉空间望远镜拍到了船尾座γ射线暴GRB031203的X余辉，距离13亿光年，

这起 γ 射线暴是欧洲空间局与俄、美合作的 INTEGRAL 探测器发现的，也与超新星有关（光盘图 10.7.15　GRB031203 示意图），图右下角是其 X 余辉。

美国天文学家发现 γ 射线暴的光子能量从高到低有一段时间延迟，而延时的长短与绝对亮度有关。因此可以根据延时的测量得知光度，再与视亮度比较而得知距离。对于那些占大多数的，无法测量谱线红移量的 γ 射线暴来说，这是另一种有效的测量距离的方法。用此方法测量的 1 437 起 γ 射线暴，大多数都在几十亿光年远的地方，只有少数发生在银河系附近的星系中。观测表明，大多数 γ 射线暴的辐射集中在一个很窄的角度范围内，以喷流的形式发出，所以 γ 射线暴的实际能量要比按各向同性的辐射来估计的能量小得多。钱德拉空间望远镜 2000 年拍到天鹰座一处超新星遗迹 W49B（光盘图 10.7.16　银河系内的 γ 暴 W49B），红色的氢分子云围绕着蓝色和绿色的 1 500°高温气体，发出强劲的 X 射线。一分钟内 γ 射线暴流量相当于 1 万个太阳的亮度，距离约 3.5 万光年，位于银河系内，可能是离我们最近的 γ 射线暴。银河系内的近处发生的 Ic 型超新星同时伴随 γ 射线暴，可能破坏地球的臭氧层，或者带来其他灾难。但由于 γ 射线暴的喷流方向性很强，只要没有正对着地球方向，我们还是安全的。有学者指出，地球遭遇 γ 射线暴袭击的概率大约是每一亿年一次。

2000 年 10 月 9 日美国发射了“HETE-2”高能暂现源探测器，与日、意、法合作探测暂现 X 和 γ 射线暴。2004 年 11 月 20 日美国发射了“雨燕”（swift）γ 射线暴探测卫星，与英、意合作，能够敏捷地调整身姿，在数十秒钟内捕捉任何 γ 射线暴，还能进行光学和硬 X 射线余辉的观测，并将位置和强度数据在 15 秒钟内送至地面，供全世界的地基和天基望远镜跟踪观测（光盘图 10.7.17　“雨燕”γ 射线暴探测卫星）。2005 年 5 月 9 日，“雨燕”卫星在天鹅座里探测到一起短时 γ 射线暴 GRB050509，在几毫秒内发出 10 亿倍太阳光度的能量，不到 1 分钟之后观测到光学和 X 射线余辉，视星等 17.3，红移量 0.226，位于 27 亿光年远处。2005 年 7 月 9 日，“HETE-2”探测器在南天天鹤座里探测到另一起短时 γ 射线暴 GRB050709，持续时间 100 毫秒，3 天后钱德拉空间望远镜测到了 X 射线余辉，哈勃望远镜和智利拉西亚、坎帕纳斯和夏威夷的地面望远镜都观测到光学余辉，红移量 0.16，位于 20 亿光年远处、一个旋涡星系的晕中。这两起 γ 射线暴不同于以往的持续时间较长的 γ 射线暴，不是由大质量恒星超爆产生的。它们被认为是两个中子星相碰撞（光盘图 10.7.18　GRB050709 的 X 射线余辉及太空画：两个中子星碰撞），或黑洞吞吃中子星时的壮观表现：中子星先被拉成弯月形，再成为黑洞的美餐，同时迸发 γ 射线暴（光盘图 10.7.19　太空画——黑洞吞吃中子星的过程）。天文学家 35 年前即已发现这种短时 γ 射线暴；约有 30%的 γ 射线暴持续时间在 2 秒以下，属于此种类型。现在终于揭开了它神秘的面纱。相关消息很快就发表在英国《自然》周刊上。两个中子星相撞，可

能形成黑洞；而黑洞吞吃中子星会形成更大的黑洞。两种情形都会导致强引力波发射，这为我们直接看到引力波这种时空波纹提供了可能性，因而具有非常重要的科学价值。2005 年，这两起发现使 γ 射线暴第四次荣登美国《科学》周刊十大科技成果。

2005 年 9 月 4 日，“雨燕”卫星在双鱼座里发现一起 γ 射线暴 GRB050904，南美洲智利的 ESO-VCT 和南双子 8 米望远镜观测到光学余辉，视星等 17.36 等，红移量竟高达 6.295，距离接近 130 亿光年，诞生于宇宙 8.9 亿岁时（光盘图 10.7.20 GRB050904 的星座位置；光盘图 10.7.21 ESO 拍摄的 GRB050904 光学余辉）。2008 年 9 月 13 日，“雨燕”卫星在波江座里又发现一起 γ 射线暴 GRB080913，南美洲智利的 ESO-VCT 望远镜观测到光学余辉，红移量 6.7，距离比前一起更远，诞生于宇宙 8.25 亿岁时（光盘图 10.7.22 ESO 拍摄的 GRB080913 光学余辉；光盘图 10.7.23 GRB080913 光学余辉照片中央部分放大）。这是两起迄今发现最遥远的 γ 射线暴。

2006 年 2 月 18 日，“雨燕”卫星在白羊座里发现一起 γ 射线暴 GRB060218，延时 900 秒；随即有 X 射线爆发，延时 2 600 秒。夏威夷 Keck Ⅰ 和地面 SDSS 望远镜同时观测到一颗 Ⅰc 型超新星 SN2006aj，红移量 0.033，距离 4.4 亿光年。估计超新星生前质量 20～25$M_{\odot}$，超爆能量 10^{42} 焦耳。这是又一起 γ 射线暴与超新星相关的例证（光盘图 10.7.24 与 GRB060218 相关的超新星 SN2006aj：左图 SDSS，右图 Keck Ⅰ 望远镜拍摄）。

超大质量恒星超爆——γ 射线爆发——中子星与中子星火拼然后塌缩成黑洞——黑洞吞吃中子星……苍茫宇宙之中这些用“山崩地裂”“海枯石烂”都远不足以形容的大规模物质转换过程，被小小地球上的人类瞭解于指掌之中，我们不得不又一次惊叹人类智慧之无穷！

10.8 引力透镜

引力透镜是强引力场中一种特殊的光学效应。早在 1912 年，爱因斯坦即提出过引力透镜的概念。假设地球与一颗类星体或星系之间刚好有一个强引力场天体（黑洞、星系或星系团），三者差不多在一条直线上，强引力场天体附近的时空弯曲使远方恒星或星系的光不能沿直线到达地球，而使地球上观测到的像偏离了它原本所在的方向，其效果类似于透镜对光线的会聚作用，称为引力透镜效应（图 10.8.1）。

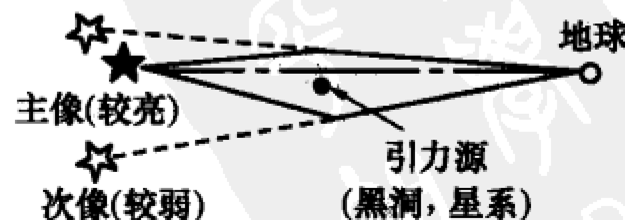


图 10.8.1 引力透镜效应

产生引力透镜效应的中间天体叫做前置天体。这一效应可能产生双重像或多

重像，这些像有相同的光谱结构和谱线位移量。引力透镜效应还可能改变像的亮度分布，或者使亮度增强，或者造成图像畸变。图 10.8.2 是使亮度增强的原理示意图。引力透镜效应还可能有放大作用，图 10.8.3 是放大作用的原理示意图。1979 年 3 月，由英、美两国天文学家组成的小组，使用美国亚利桑那州基特峰天文台 2.1 米口径的望远镜观测到一对类星体 Q0957＋561A 和 Q0957＋561B，二者亮度相同，都是 17 等，角距离仅 6″.2，而且光谱结构相同，红移量都是 1.405，被判断为是同一个类星体的两个孪生像。这是天文学家观测到的第一例有引力透镜效应的类星体。不过造成透镜效应的中介天体被认为是一个暗弱的星系而不是黑洞。1985 年地面望远镜的巡天观测发现一例著名的"爱因斯坦十字"引力透镜效应：由 5 个光斑呈对称形簇拥在一起，中央光斑是一个距离我们 4 亿光年的亮星系，周围 4 个光斑是远在 80 亿光年处的一个暗弱星系，因中央亮星系的引力透镜效应，亮度得到增强并分开成 4 个像。光盘图 10.8.4 是哈勃望远镜拍摄的爱因斯坦十字（光盘图 10.8.4　爱因斯坦十字引力透镜效应）。

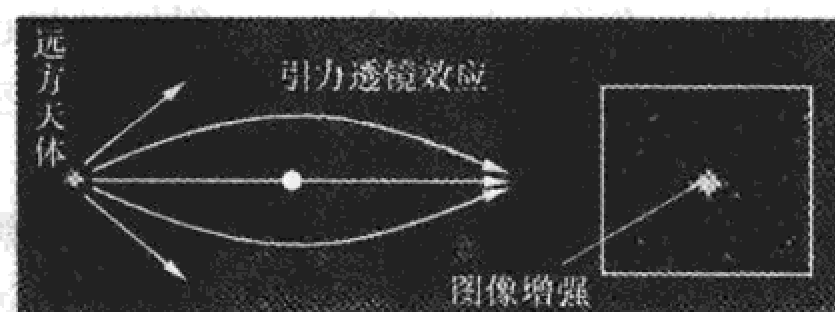


图 10.8.2　引力透镜效应使亮度增强

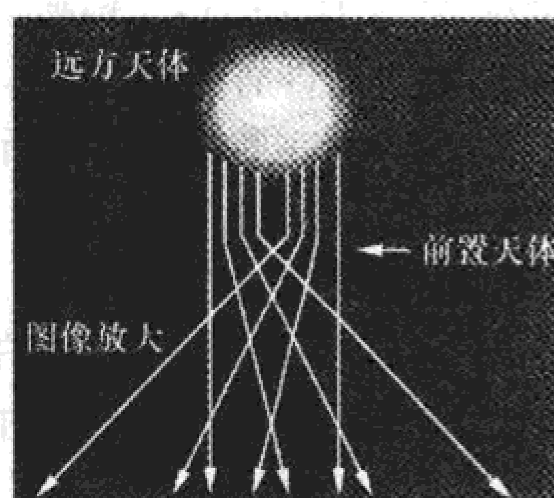


图 10.8.3　引力透镜效应使像放大

2000 年 4 月钱德拉空间望远镜拍摄到类星体 H1413＋117 的四重像，位于牧夫座，距离 110 亿光年，前置天体是一个旋涡星系（光盘图 10.8.5　H1413＋117 引力透镜效应）。左下是钱德拉拍摄的 X 图像，上部是示意图。光盘图 10.8.6 是位于夏威夷的日本 8 米光学望远镜拍摄的类星体 PG1115＋080 的四重像（光盘图 10.8.6　PG1115＋080 引力透镜效应）。前置天体是一个距离 30 亿光年的椭圆星系，而类星体距离 80 亿光年。左图是可见光与近红外的合成像，右图是远红外图像。光盘图 10.8.7 是哈勃望远镜拍摄的类星体 14176＋5226 的四重像（光盘图 10.8.7　14176＋5226 引力透镜效应），前置天体是一个距离 70 亿光年的椭圆星系，而类星体距离 110 亿光年。光盘图 10.8.8 是哈勃望远镜拍摄的引力透镜 18078＋4600 图像（光盘图 10.8.8　18078＋4600 引力透镜效应），前置天体是一个星系团，图中显见其中 4 个成员，而蓝色光弧是远方一个星系被引力透镜效应造成的幻像。

20 世纪 90 年代，哈勃望远镜拍摄到天龙座富星系团 Abell 2218 的引力透镜效应照片。中央球状椭圆星系距离我们 20 亿光年，其周围分布着 120 段纤细的同心圆弧，是在星系团后面约 100 亿光年处的一些星系由引力透镜效应生成的幻景（光盘图 10.8.9 Abell 2218 引力透镜效应）。光盘图 10.8.10 显示局部放大图（光盘图 10.8.10 Abell 2218 的局部放大图），方框中的两个红色暗点，是一个距离 132 亿光年远的星系的双重像。2002 年 6 月哈勃望远镜又拍摄到室女座 Abell 1689 星系团的引力透镜效应照片（光盘图 10.8.11 Abell 1689 引力透镜效应）。前置天体 Abell 1689 星系团有数千个星系，距离 22 亿光年，将其身后几百个几十亿光年远处的星系歪曲变形，最远的达 130 亿光年。星系团 CL1358+62 位于大熊座，距离 50 亿光年。引力透镜效应产生一道弯弯的黄色长弧是距离 130 亿光年的遥远星系的幻像（光盘图 10.8.12 CL1358+62 引力透镜效应）。大熊座旁边的天猫座星系团中，哈勃望远镜拍到一段红色的亮弧，叫做天猫弧（光盘图 10.8.13 引力透镜效应天猫弧），是天猫星系团造成的引力透镜效应幻象。弧当中有一对亮点，被判断为有新恒星诞生的星云，距离 120 亿光年，是迄今看到的最遥远有新恒星诞生的星云，比银河系中的猎户云亮 100 万倍。双鱼座中的星系团 0024+1654，距离 50 亿光年，有 5 个蓝色幻像 A、B、C、D、E 属于同一个 100 亿光年远处的星系，这也是哈勃望远镜的杰作之一（光盘图 10.8.14 0024+1654 引力透镜效应）。另一杰作是天炉座星系团 J033238-275653，由红、蓝、绿各种类型的星系组成，距离 60 亿光年。中央一道蓝色的蛾眉月形弧线，是 100 亿光年远处的一个星系的引力透镜效应幻像（光盘图 10.8.15 J033238-275653 引力透镜效应）。

2006 年 5 月 23 日释放的哈勃望远镜引力透镜效应照片，前置天体是星系团 SDSSJ1004+4112，位于小狮座，距离 70 亿光年。远在 100 亿光年处的一个类星体畸变出 5 重像。一些被畸变为弧形的星系，最远达 120 亿光年（光盘图 10.8.16 J1004+4112 引力透镜效应）。2007 年 3 月 2 日释放的哈勃望远镜引力透镜效应照片，前置天体是星系团 Abell 2667，位于玉夫座，距离 28 亿光年。图中一道蓝弧是远在 32 亿光年处的一个星系畸变而成，被称为“星系团中的彗星”（光盘图 10.8.17 Abell 2667 引力透镜效应）。由引力透镜效应而使远方天体呈环状图像，称为爱因斯坦环。光盘图 10.8.18 是哈勃望远镜在 2004 年 8 月至 2005 年 3 月的巡天观测中发现 8 个爱因斯坦环（光盘图 10.8.18 引力透镜效应产生的爱因斯坦环），表 10.8.1 是这 8 个爱因斯坦环的有关信息。光盘图 10.8.19 是 2007 年 10 月 9 日英国《自然》杂志发表的爱因斯坦环“宇宙之眼”的照片，哈勃望远镜拍摄。前置天体是星系团 J2135-0102，位于宝瓶座，$z=0.33$。被畸变的天体 $z=3.07$，距离相差约 3 倍（光盘图 10.8.19 “宇宙之眼”爱因斯坦环）。

表 10.8.1　8个引力透镜效应产生的爱因斯坦环

名称编号	赤经（J2000）	赤纬（J2000）	观测日期	前置天体红移量	背景天体红移量
J073728.45+3216	07 37 28.44	+32 16 18.7	2004.9.21	0.322 3	0.581 2
J095629.77+5100	09 56 29.78	+51 00 6.4	2004.10.30	0.131	0.467
J120540.43+4910	12 05 40.44	+49 10 29.4	2005.3.8	0.215	0.480 8
J125028.25+0523	12 50 28.26	+05 23 49.1	2005.3.12	0.231 8	0.794 6
J140228.21+6321	14 02 28.22	+63 21 33.3	2004.8.4	0.204 6	0.481 4
J162746.44−0053	16 27 46.45	−00 53 57.6	2005.3.20	0.207 6	0.524 1
J163028.15+4520	16 30 28.16	+45 20 36.3	2004.10.4	0.247 9	0.793 3
J232120.93−0939	23 21 20.93	−09 39 10.3	2004.9.6	0.081 9	0.532 4

产生引力透镜效应的前置天体可能是有巨型黑洞的星系、星系团，也可能是非重子暗物质。一些遥远因而暗弱的星系，原本无法观测到，由于引力透镜效应的亮度增强作用而被观测到了。引力透镜效应也是发现暗物质的探针。引力透镜效应是探测黑洞、研究暗物质以及探索星系形成和演化的有力工具（参见12.8节）。

10.9　黑洞奇点、白洞和虫洞

不仅爱丁顿怀疑黑洞存在的真实性，就连爱因斯坦本人也不支持宇宙中可能存在黑洞的想法。

黑洞理论的最不可思议之处，是黑洞中心的奇点光有质量没有体积，密度为无限大。无论从物理理论还是从人们日常生活经验这都是不可理解的。然而，两位当代著名的英国物理学家彭罗斯和霍金已经从理论上严格证明，奇点是广义相对论的必然结论。如果出现大质量恒星的引力塌缩，它的结局将成为黑洞并出现奇点是不可避免的。要否认这一结论，恐怕只有摒弃或者修改广义相对论。彭罗斯是数学博士。大学时代，他听到学校的广播电台里霍伊尔的一系列宇宙学讲座，深受感染而倾心天文，终于成为一位既精通数学又精通物理的宇宙学专家。他对奇点必然存在的证明，使用了纯数学中的拓扑学方法；而在他之前，天体物理学家从来没有人使用过，甚至没有人了解拓扑学。霍金在掌握了拓扑学之后，与彭罗斯等共同创立了一套有力的、结合拓扑学和几何学的广义相对论的计算工具，推动了黑洞理论的深入发展。

黑洞的视界隐蔽了视界内的一切。在视界内，奇点附近的时空特性使大多数自然定律都要失去意义，但由于视界的屏蔽作用，外界对此毫无感知。对于一个快速自转的大质量黑洞，保存下来的角动量可能大于一个临界值，转动产生的惯性离心力也许会使黑洞的视界不能稳定地形成，奇点没有视界的严密保护而裸露着，称为裸奇点。这在理论上是可以容许的。由于奇点所具有的奇妙特性，它对

时空的影响完全不可预测。果真出现裸奇点的话，现有的一切物理定律也许都要重新考虑。为了不致陷入如此窘境，彭罗斯提出一条假设：自然界有某种规则禁止出现裸奇点。换句话说，引力塌缩一定会使奇点严密包裹在视界之中，奇点与外界之间不存在任何联系，奇点永远都不可能被我们观测到，奇点对外界不产生任何影响。这一假设被彭罗斯称为“宇宙监督”。这一假设虽然用广义相对论本身无法证明，却也无法推翻，而现实宇宙的状况说明至今没有出现过与之相违背的情况。

曾经有人提出，当前我们所处的宇宙本身是一个大黑洞。他们根据宇宙的总质量计算相应的史瓦西半径值，认为现实宇宙的尺度小于这个半径值，于是整个宇宙处于一个大黑洞的视界以内。若果真如此，至少会出现两个无法理解的问题：其一，整个宇宙在黑洞的视界里，那么视界之外必定还有更广阔的世界。我们的信息传不出去，我们与外部世界是永世隔绝的，但毕竟存在着另一个更广阔的世界，而且很可能随时有“外界”的东西钻进来。可是按人对宇宙的理解，宇宙是包容一切的，它的外面不可能有任何东西，甚至应该说它没有“外面”，这作何解释呢？其二，我们是在黑洞的视界里，但我们显然并没有落在一个只有质量没有体积的奇点上，否则我们自身以及我们所掌握的一切规律都成为毫无意义的，这难道不奇怪吗？

现在，势必要追溯的，就是在黑洞的奇点问题上，广义相对论究竟是否正确？彭罗斯和霍金的理论证明越是严密，这一问题就越尖锐，越说明广义相对论存有漏洞，或者说它被运用到了其适用范围之外。

广义相对论是人类迄今最好的引力理论，被誉为“人类智能最伟大的成就”(M. Born)，“思维威力的一个最美妙的例证”(H. Weyl)。广义相对论常被比作一项优美的抽象艺术创作，说“它具有优美的特征，伟大的数学美”(M. Dirac)。爱因斯坦本人也说过：“如果他不发表狭义相对论，很快就会有别人发表；如果他不发表广义相对论，那么，100 年也不会有人发表。”然而也有人认为，一个理论的优美并不保证它的正确，“爱因斯坦的理论不属于物理理论的范畴，它是一种先验的、凌驾于一切之上的、不可理解的理论。”(H. Bouasse) 广义相对论的薄弱之处，是没有考虑微观世界的量子力学原理，而黑洞的奇点刚好是涉及微观世界中极小尺度时空结构的范例。

量子力学的理论基石之一是海森堡的测不准原理，即原则上不可能同时精确地知道任何物体的位置及速度（详见 5.1.5 小节）。而根据广义相对论，引力场中不同位置处的时空不同，要精确测量不同时空之间的微小差异，就得精确地知道钟的速度和钟在引力场中的位置。两者结合在一起，结论就是：如果时空小到一定的限度范围之内，相对论正确与否的可测量性与量子理论不能同时成立。在这个尺度上，时空是不连续的，或者说时空是量子化的。这一尺度称为普朗克时

空尺度。由理论导出的公式为：时间的普朗克尺度 $t_p = \sqrt{hG/2\pi c^5} = 5.3908 \times 10^{-44}$ 秒；空间的普朗克尺度 $l_p = \sqrt{hG/2\pi c^3} = 1.6161 \times 10^{-35}$ 米。式中，h 是普朗克常量，G 是万有引力常数，c 是光速。空间的普朗克尺度与质子半径之比，相当于人的身高与银河系半径之比。在普朗克尺度上，空间和时间是测不准的，或者说在这个尺度上，时空概念本身需要重新被考虑，爱因斯坦相对论要让位于新的理论，不妨称其为“量子引力理论”。这一新的理论也是爱因斯坦本人后半生所致力而没有成功的领域。直到现在，在所谓“后爱因斯坦理论”的研究工作中，虽然出现了一些有价值的思想，但仍然没有多少头绪。用约翰·惠勒的说法是，“广义相对论与量子力学将在这里联姻”，而未来的产儿“量子引力理论”也许有能力对黑洞奇点问题作出完满的解释。人类认识浩瀚宇宙的历史毕竟还是太短太短了。

白洞（white hole）是根据物质世界的对称性，纯粹由理论引申出来的概念。最早使用这一名词的是1971年耶尔明（R. M. Hjellming）的一篇文章。白洞是黑洞的时间反演。在所有关于黑洞的方程式中，将时间量前面加一个负号，就都适合于白洞。白洞也有一个视界。与黑洞相反，所有物质和能量都不能进入视界，而只能从视界内部逃逸出来。白洞是宇宙中的喷射源。白洞视界里的奇点也许藏匿着无穷尽的物质，以与黑洞吞噬物质相反的方式向外界喷吐物质和能量。宇宙创生的大爆炸理论描述了我们现在所观测到的宇宙中的一切：行星、恒星、星系，甚至原子核和夸克，都是源于137亿年前的一个物质的奇点。这个奇点就很符合白洞所描述的概念。然而白洞的说法毕竟是非常粗糙的，具有狂想性质。正如丹尼斯·萨顿（D. Sutton）所说：“科学的前沿总是一种由新的真实、合理的假设和轻狂的猜想组成的奇怪的组合”。对照而言，广义相对论属上述混合物中的第一种成分，黑洞属于第二种，而白洞则适合第三种。不过，在科学发展的历史上，确曾有些“轻狂”的猜想起过推动进步的作用。有鉴于此，白洞理论还是值得注意的。

比白洞更“轻狂”的猜想是“虫洞”。这个名词也是为黑洞取名的惠勒想出来的。“虫洞”是连接黑洞与白洞的某种神秘的通道，像是水果中的蛀虫作出的劣迹。宇宙中的物质和能量可能在进入黑洞视界到达奇点后，沿着“虫洞”再从白洞的视界喷射出来（图10.9.1）。

也许有什么特殊的办法能够进入黑洞而没有遭厄运，并且通过虫洞和白洞进入到另一个五光十色、完全不为人知的宇宙中去。也许我们现在所观测到的宇宙是在比137亿年更久远的“以前”，由另一个宇宙塌缩后进入黑洞，又经虫洞，从白洞中喷射、爆发出来的。西方一个很严肃的基金会“培根基金会”曾在英国《自然》杂志和其他杂志上刊登广告，悬赏300英镑，征求对下述问题的解：“按

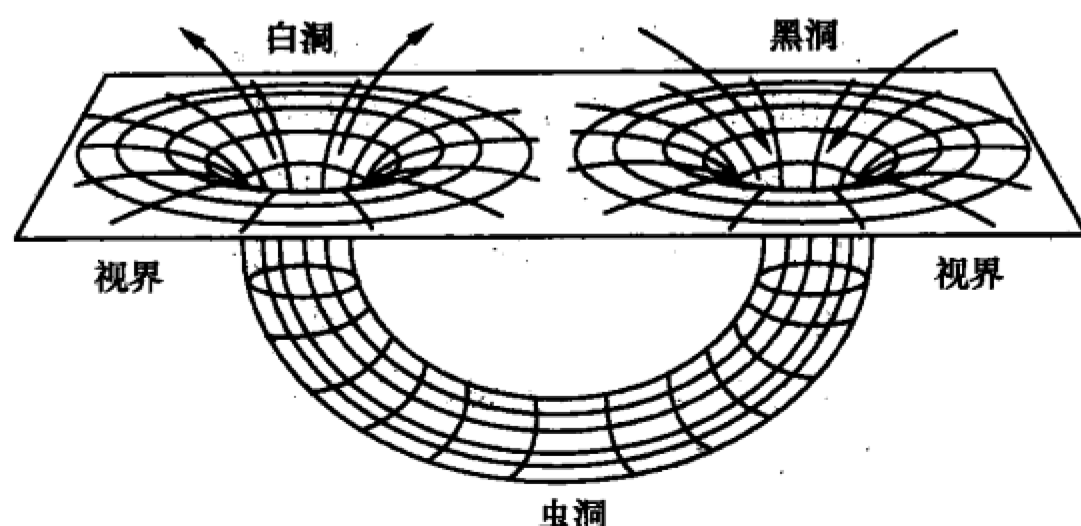


图 10.9.1 黑洞、白洞与虫洞

照现有的理论，旋转黑洞是通往另一个时空区域的真实入口，那么一个飞行器怎样才能通过一个旋转黑洞进入另一个时空区域而不被奇点的引力场粉碎呢?”至今无人应答。科学前沿中混杂着的“轻狂”对社会公众能产生魅力，也许会增加科学家探索未知的乐趣。但是我们不要忘记科学的真实与假设和轻狂之间应有的界限。

1988 年索恩（K. S. Thorne）和他的两名学生在《物理学评论通讯》上共同发表了一篇论述虫洞和时间机器的文章。他们认为，虫洞很可能是宇宙中相距遥远的两个奇点之间的一条神秘通道，这条通道开在现实三维空间之外的超空间（第四维或更高维度）里。图 10.9.2 采用抽掉一维空间的方法，画出了只剩下二维的现实空间和超空间的示意图，地球与织女星的空间距离（表达在二维曲面上）为 26 光年，但这个空间是弯曲的。有可能在地球与织女星附近，存在一条穿越超空间的快捷通道，这条快捷通道就是虫洞。

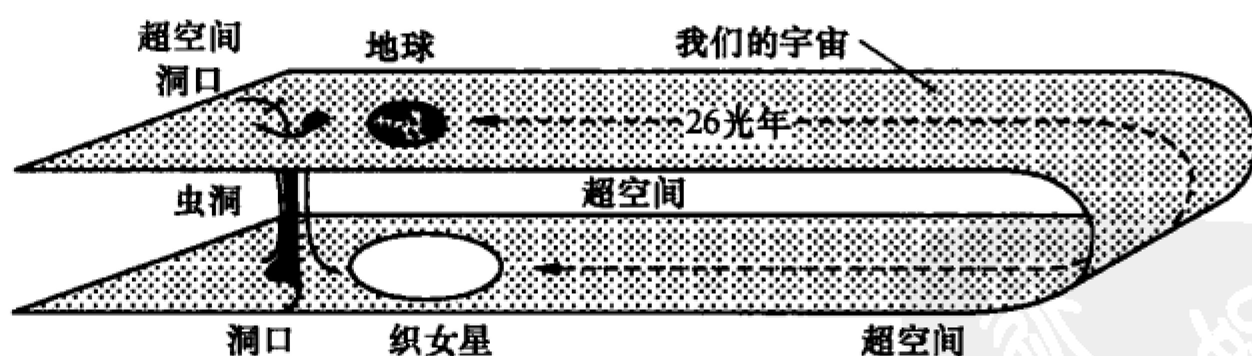


图 10.9.2 穿越超空间的虫洞

聪明的人类能够通过虫洞实现超远距离的宇宙旅行吗？按照广义相对论的计算，超空间中的虫洞只能在某个极短的时间里打通，然后迅即关闭。任何企图在虫洞打开的短暂时间里穿过去的事物，都将在虫洞关闭的时候被捕获而消失在奇点之中。一种奇想是，有某种具有负能量的射束，在贯穿虫洞时能够撑住洞壁而不让其关闭。能量与物质等价；物质产生引力。与负能量相应的物质是否具有神秘的反引力（斥力）而使虫洞维持通畅呢？

通过虫洞实现超远距离宇宙旅行的设想，也许能使超越光速成为可能。于是一些科幻小说所津津乐道的时间隧道等就有了科学根据。这也是索恩关于时间机器所讨论的问题。霍金对此持反对态度。他认为，物理学定律不允许有时间机器。时间只能向前不能向后的特性是不容破坏的。不论用什么样的事物，如虫洞、宇宙弦或别的什么东西，制造时间机器时，最终总会有某种规律使之不能成功，以“保证世界不会破坏历史”。然而索恩却争辩说：“在物理学深刻认识量子引力理论之前，我们谁也不能下结论。”



第 11 章　地 外 文 明

上帝就照着自己的形象造人……

——《圣经·创世纪》

对科学家来说，生命是自然界中最令人惊讶的现象。

生命的奥秘不在原子里，而在原子的组合模式里。

科学家们普遍认为，生命是一种物质的自然状态，不过，是一种可能性很小的状态。

——保罗·戴维斯，《上帝与新物理学》

迄今为止，宇宙中唯一已知有文明存在的星球就是地球。在地球以外的太阳系行星上，在银河系的千亿颗恒星周围，在银河系外的茫茫宇宙之中，难道就再也找不到别的文明了吗？人们苦苦地思索着、寻觅着……长期以来，地外是否存在文明的问题只停留在一般猜想或哲学的推理上，直到 20 世纪 60 年代以后，才真正进入严肃的科学研究领域。虽然尚未取得任何直接的证据，但已在生命科学、地球科学和天文学领域里，有了许多观测事实和研究成果，使人们更加相信地外确实存在生命乃至文明的科学结论，只是由于时间和空间的阻隔，人类还没有同他们取得联系。地球上的人类渴求早日遇到来自天外的知音。在世界的一些角落里，许多实际的探测研究项目正着手进行着。在人类所有的科学研究项目中，再也没有比确实探测到地外文明更为激动人心和对人类观念产生更大冲击的成果了。

11.1　生命的含义与生命起源概述

根据生物分类学家的研究，今天生活在地球上已经确知的并已正式命名的生物种类约有 170 余万种。按照 1969 年才确定的五界分类系统，这 170 余万种生物中，动物界有近 120 万种，植物界有近 50 万种，真菌界 4.5 万种，其余属原核生物界和原生生物界。还有更多的物种没有被发现，估计总数超过 1 000 万种。如果加上已经灭绝了的物种，从生命起源到现在，地球上总共大约生存过 5 亿种不同种类的生物。现代分子生物学已在分子水平上揭示了如此纷繁的生命世界，从地球早期的单细胞生物到现代高等植物和动物，组成他们的生物大分子，在基本结构和基础生命活动方面有高度的一致性。

能否活动并不是生命的根本特征。跳动的火焰和飞逝的流云都不是生命。生命现象至少具有三种基本特征，这就是自我复制、兴奋性与自我更新。任何生物个体的寿命都是有限的，必然要衰老、死亡。一切生物都是通过产生新个体来延续种系。生物体生长发育到一定阶段后，能够产生与自己相似的子代个体，这种功能称为生殖或自我复制。各种生物体都生活在一定的环境中，当它所处的环境发生某些变化，生物体能主动地做出适当的反应，以适应环境的变化，反应的过程及其表现称为兴奋。生物体产生兴奋的能力称为兴奋性，它是生物能够生存的必要条件和基本表现。生活在适宜环境中的生物体总是在不断地重新建造自身的特殊结构，同时又在不断地破坏自身已经衰老的结构。它的各个部分都在不断地以新合成的生物分子代替旧的。这个过程称为新陈代谢或自我更新。生物体只有在与环境进行物质与能量交换的基础上才能实现自我更新。新陈代谢是一切生物体必不可少的生命活动，如果生物体停止自我更新，它的生命也就结束了。非生物不能表现生命活动，只有生物才具有生命。但生物体也可能在一定时间内不表现生命，如处于特殊冷冻状态下的生物组织等。在一些似生物非生物的物体身上，有时候很难划出生命和非生命的界限。如烟草斑纹病毒的结晶，并没有新陈代谢和兴奋性的表现，但它却能在进入烟叶毛细胞后，迅速复制出大量烟草斑纹病毒。很难确切地说它是有生命的还是无生命的。

细胞是生物的基本构成单元（除病毒外）。高等生物是由许多结构和功能不同的细胞组成的。人体约有 10^{14} 个细胞，平均尺度 10 微米，每个细胞平均含有 10^{12}～10^{14} 个原子。所有生物细胞主要成分都是蛋白质和核酸。蛋白质是多种氨基酸的组合体。核酸分 DNA（去氧核糖核酸）和 RNA（核糖核酸）两类。DNA 和 RNA 又是由几千个乃至几百万个核苷酸组成。氨基酸和核苷酸都是大的有机分子，前三位的组成元素按原子个数列序是 H、O、C，按质量列序是 O、C、H。DNA 接受和储存遗传信息，RNA 按照 DNA 的信息选择细胞里的氨基酸合成蛋白质；生命通过蛋白质表现出来，而蛋白质的合成由核酸控制。核酸负责自我复制，蛋白质的活动充分体现了兴奋性与自我更新。生物体的兴奋性是由对环境十分敏感的感受细胞，通过生物电信号的传送，使机体各部分迅速产生生物电变化，以适应环境而表现出来的。组成蛋白质的基本氨基酸一共只有 20 种，它们的名称是：苷氨酸、丝氨酸、苏氨酸、半胱氨酸、酪氨酸、赖氨酸、精氨酸、组氨酸、天冬氨酸、谷氨酸、丙氨酸、缬氨酸、亮氨酸、异亮氨酸、甲硫氨酸、苯丙氨酸、色氨酸、脯氨酸、天冬酰胺和谷氨酰胺。就像 7 个音符幻出万般千种的音乐，26 个字母写成千变万化的文章一样，20 种氨基酸原料，能组合成地球上亿万种不同的生命。作完下面的计算，你就会相信，这是毋庸置疑的。较大的蛋白质含有几万个氨基酸。假设每个蛋白质分子都由 100 个氨基酸组成，那么从 20 种氨基酸中任取 100 个排列组合，就像一种 20 进制的数，取 100 位，从

“全0”排到“全19”那样，总共会有 $20^{100}=1.26\times10^{130}$ 种组合花样。即使每种花样只合成一个分子量为10 000（有的蛋白质分子量高达几百万以上）的分子，这一个分子的质量是 $10\,000/N_0$ 克 $=1.7\times10^{-20}$ 克（N_0 是阿伏伽德罗常量。分子量为10 000，意味着 N_0 个这种分子的质量是10 000克），而合成出来的全部分子的总质量将达到 10^{104} 吨，是太阳系总质量的 10^{77} 倍，地球质量的 10^{83} 倍，远远超过当今可观测宇宙的总质量（据爱丁顿的计算，整个宇宙的质子和中子总数为 10^{80}）！

生命的奥秘不在原子里，而在由原子组成的DNA和RNA之类的分子结构所包含的信息之中。报纸上一张由众多小点组成的人像，任何一个单独的小点都没有包含人的形象信息，但众多小点特殊的集结方式，却表现出生动的人像照片。组成人体DNA的原子与组成恒星的同一种元素的原子并无二致，但一个人身体中的DNA分子由31.647亿对核苷酸碱基组成双链结构，人的全部遗传密码都存储在其中。如果把一个人的全部DNA分子链拉直排列，其长度将相当于地球至太阳距离的600倍。生命是一种高度有序的结构，即便是最原始的单细胞生物，也都显示出任何人工制品都无法比拟的复杂与精巧。但是，当代科学家们相信，生命是物质的，生命不是上帝的创造，而是长期自然选择的结果。不管产生生命的机制是什么，只要有了合适的物理和化学条件，生命的发生是理所当然的。

地球上生命的起源问题是一个还没有完全解决的问题。17世纪以前人们相信亚里士多德的“自然发生论”，认为在自然的土、水、气、火四种要素之外存在一种“生命力”（精质），能使无生命的物质转变为生命物质。人们相信“腐肉生蛆”和“破旧衣服包内的乳酪碎片生出老鼠”这样的奇谈怪论。19世纪中叶，著名的巴斯德（L. Pasteur）实验有力地否定了这些怪诞的说法，它向人们展示了在显微镜下可以看到，空气中有大量的微生物，食物的腐败、发酵和动植物生病都是这些看不见的微生物的生命活动所致。绝大多数生物学家转而相信“生物起源论”，即“生物必须要由有生命的东西产生”。但最初的生命又是怎么发生的这个问题却成为悬案。一种说法支持“地球外输入论”，认为地球上的生命是由地球以外的生命物质传播而来的。当代著名的英国天文学霍伊尔（F. Hoyle）提出过，地球上的前生命有机物可能来自彗星散落的宇宙尘。即便如此，仍然没有解决地球以外乃至宇宙中的生命从何而来这个问题。

现在关于生命本质问题的研究，以及一些仿真地球原始环境的著名实验，令人信服地表明，生命完全有可能是在地球上发生的，最初的生命形态是在原始地球环境下经过长期的化学演化和生物演化逐渐形成的。最早提出这一理论的是前苏联生物化学家奥巴林（A. Я. Опалин）。他认为原始生命的形成分三个阶段：①由无机物合成简单碳化物，在水和酸的作用下产生碳氢化合物，在阳光、闪

电、火山活动提供的能量支持下经氧化形成烷、醚、醛等有机物。②大量简单有机物随雨水汇集于原始海洋中，长期积累到一定的浓度而生成复杂的大分子结构——氨基酸和核苷酸。③氨基酸和核苷酸合成蛋白质和核酸，原始生命就诞生了。有自我复制能力的原始生命由非细胞形态到细胞形态，由简单的原核细胞到有细胞器结构的真核细胞，由异养型生物到自养型生物，由单细胞到多细胞，由无性繁殖到有性繁殖，由简单到复杂，由水生到陆生，由低级到高级。这就是地球上形形色色生物的演化过程。

11.2　地外生命存在的科学依据

11.2.1　前提

生命、文明在地外是否存在，作为一个值得探讨的科学问题，必须以地球上人类长期积累的科学知识、推理方法为依据，随时准备接受科学实验或观测事实的检验。

迄今为止，人类所认识到的生命现象都是地球上的，人们从来没有见识过地球以外的生命形态，不可能从没有见识过的东西中总结出关于那种东西的任何经验和知识。宇宙中也许存在着完全是另一种模式构建而成的生命，也许它们不需要水、不需要氧气，也不符合我们所熟知的 DNA 概念……但我们完全不具备关于别种模式生命的任何知识（也许将来会有）。现阶段要回答宇宙中是否存在地外生命的问题，只能首先探寻那些符合地球模式的生命现象。

根据对地球上生命现象的研究，生命只能生存在行星上。这颗行星要有水、有合适的大气。行星不能离恒星太近，也不能太远：近了，水要化成蒸汽；远了，水要结冰。恒星的质量不能太大也不能太小：大了，恒星寿命太短，生命来不及形成和进化；小了，不能提供促使生命形成的足够的能量。科学的观点认为：生命是物质的；构成生物体的材料同构成非生命物体的物质材料，即各种化学元素以及其中的质子、电子、中子等基本粒子都是一致的；所有物质之间相互作用的物理、化学过程及遵循的规律，所有物质、能量、信息交换的机制和方式，都是一致的。虽然地球只是浩瀚宇宙中一个极其微小的局部，但天文学研究已经证实，在地球以外的广阔宇宙中，构成恒星、星系、星际物质等物质的基本材料，连同上述规律、机制、方式也都是一致的。如果地外存在符合地球模式的生命，那么构成它们的材料，结构方式、生存条件和地球上的生命也应当是一致的。承认宇宙的物质性及其规律的统一性也是一切自然科学研究的前提。离开这一前提，认为“外星人”可以用一种与地球人的科学概念完全不同的方式，比如可以不受重力场的影响，可以不遵守人类已经认识到的科学规律，甚至可以在炽

热的恒星表面上生存……就会陷入不符合推理原则的“特殊创造”论。这不是科学，同“神创论”不是科学一样。失去前提，问题就无法讨论了。

11.2.2 生命存在的环境条件

地球是生命的摇篮。地球上繁衍生息着千姿百态的生物，是因为地球上有适宜生物生存的环境条件。在一个质量适中的单一恒星的行星系统中，离恒星的适当距离，恰到好处的自转和公转，富含氧气并能提供防护的大气层，适宜的温度、大气压和重力场，溶液的存在和水的循环，有足够量的水而又有适量的陆地，不至于全球都陷于汪洋泽国……以上种种构成了生命存在所必需的自然环境。

地球上生命能耐受的温度极限是−200～+100℃，压力的极限是1亿帕（相当于地球表面大气压的1 000倍）。在美国黄石公园的沸腾泥浆中和太平洋马利亚纳深海沟中都有生命存活，那里的温度和压力分别达到了极限程度。使生物具有生命活力的温度范围是−10～+50℃。太空活动表明，生物可以适应无重力的环境，但行星重力太小就会失去大气和水，对生命构成威胁。重力太大会使生物体难以支撑自身的体重。水是生命之源。水、有机分子、无机离子是组成原始生命的三大要素。起源于海洋中的生命，学会了把海水携带到自己的身边，生命才有可能移居到陆地上。人类早已离开海洋生活环境，但其体液中仍具有与原始海洋十分近似的离子成分。

水还具有一种对生命繁衍特别重要的物理性质：在0～4℃膨胀系数是负值，即冷胀热缩，使结成的冰比水轻而浮于表面不沉入水底。当冰层结到一定厚度时又能阻挡热传导的作用而使冰层下的水不致继续冻结，这就保住了水中的生命安全越冬。

生物的生存环境除物理环境外还有生物环境，是由包括它自身在内的一些其他有生命的有机体组成的。生物环境影响局部的物理环境，物理环境又反过来影响生物的发展和演化。

11.2.3 有关地外生命的观测和实验

20世纪60年代天文学四大发现之一是在射电望远镜的观测中发现了遥远星际物质中存在有机分子谱线。这一领域的开拓者，美国物理学家汤斯曾获得1964年诺贝尔物理学奖。第一条分子谱线（OH）是1963年在仙后座A射电源中找到的，以后又陆续找到星际氨分子和水分子的谱线，1969年又找到了星际有机分子甲醛的谱线。20世纪70年代又观测到许多品种的星际有机分子，包括一些地球上未见过的奇异分子。至1994年底，已发现和认证的星际分子总数达108种（不包括同位素分子），至2006年6月增加到146种。其中大多数是由氢、氧、碳、氮、硫等元素——被称为生命元素组成的有机分子，包括烯、炔、

醛、醇、酮、酯、酰胺、醚、腈各类。1973 年以来，红外线观测发现了宇宙尘埃表面的多环芳香族碳氢化合物，如 $C_{18}H_{12}$，$C_{16}H_{10}$，$C_{24}H_{12}$等。近年来还在晚型恒星的星周包层中检测到多种碳链分子（详见 8.4）。这些发现表明：在宇宙中许多地方，由无机物形成有机物的化学演化早已完成。这为由有机物形成生物大分子结构，进而发展生物演化准备了充足的物质基础。

1969 年 9 月 28 日陨落在澳洲的麦其逊陨石碎块，总重约 82 千克。经气相色谱法分析测定，陨石中含有 2.5%的有机物，其中包括 11 种氨基酸。这些氨基酸有左旋和右旋两种结构，数量各占一半，而地球上生物体蛋白质中的氨基酸都是左旋的。这说明它们是在地球以外通过化学进化形成的，而不是源于地球物质的“污染”。人们对 1950 年陨落在美国肯塔基州的墨瑞陨石也作了类似的分析研究，发现其中也含有氨基酸。1976 年 3 月 8 日陨落中国吉林的陨石（详见 4.5.4 小节）中，也发现有 11 种氨基酸和嘌呤、烷烃、二烯烃等有机物。虽然存在一些争论，以及对这些陨石的来历还难以判断，但在地球以外的环境中，有机物和生命的前物质——氨基酸大分子的存在是意义重大的。1996 年 8 月 16 日美国约翰逊空间中心的麦凯（D. Mckey）在《科学》周刊发表了对来自火星的陨石 ALH84001 的研究，轰动了世界。这块陨石是女地质学家斯科尔（R. Score）1984 年 12 月 27 日在南极艾伦山无意之中发现的（ALH 是艾伦山的缩写，84 指 1984 年）重 1 930.9 克（光盘图 11.2.1　ALH84001 火星陨石）。麦凯的研究指出，它于 1 600 万年前火星遭遇撞击时飞离火星在太空飘荡，13 000 年前降落地球。切片化验发现它含有多环芳香烃类有机物质；在电子显微镜下显示有 10～100 纳米级的碳酸盐颗粒（光盘图 11.2.2　电镜下的碳酸盐颗粒图片）和类似细菌模样的结构（光盘图 11.2.3　电镜下的纳米细菌图片）。

1828 年，德国化学家维勒（F. Wöhler）首次用无机物合成了有机物尿素 $CO(NH_2)_2$，证明了在无机物和有机物之间并不存在不可逾越的鸿沟。1953 年，美国生物化学家米勒（S. L. Miller）根据设想的地球 30 亿年前的原始大气条件，在封闭的容积为 5 升的烧瓶中使用甲烷、氨、氢和水蒸气混合循环流动，并通过两个钨电极加以人工火花放电持续一周，然后对烧瓶中累积的产物用色谱仪进行分析，鉴定出多种有机化合物，其中包括四种氨基酸（丙氨酸、谷氨酸、甘氨酸和天冬氨酸）。在米勒之后又有许多类似的生命物质生化实验，如奥维尔（L. Orvel）合成了核苷酸中的重要组成部分腺嘌呤，福克斯（S. Fox）合成了多种氨基酸的长链。

1965 年以王应睐为首的中国生物化学家，首次人工合成蛋白质——结晶牛胰岛素，与天然牛胰岛素具有同样的活力和物理化学性质。这是人类首次从氨基酸合成具有生物活性的蛋白质分子的真正说明问题的例子。

核酸中的 DNA 是基本的遗传物质，即基因的物质基础，美国科学家首先合

成 DNA 成功。1976 年，科拉纳（H. G. Khorana）成功地合成了大肠杆菌氨基酸的基因，并因此获得诺贝尔奖。1979 年美国又合成了有 207 对核苷酸的基因。RNA 也于 1979 年和 1981 年由日本的池原森男和中国的王应睐等人工合成成功。当代生命科学面临的下一个工程就是在成功合成蛋白质、核酸的基础上，向人工合成细胞进军，真正做到合成一个活的化合物——生命。虽然征程尚远，但目标已经确定了。

中国生物物理学家贝时璋研究“细胞重建”工作，发现生物体内细胞的繁殖增生，除细胞分裂这一常规途径外，还有一种从更基础的物质一步一步地组成完整细胞的途径。这种生物合成细胞的过程很可能是原始地球上细胞起源过程在现代生物体内的缩影。

地球上的实验和太空中的发现使人们相信，广袤的宇宙中不应当只有地球上有生命形成的机会。合成地球生命的基本元素氢、氧、碳、氮、硫在已发现的星际有机物质中也是含量最高的元素。据地质和古生物学家的考察，地球上最早的原核细胞出现在 36 亿年之前，说明大自然完成化学演化进入生物演化的进程只花了 10 亿年，而从原始生命到现代人类却进化了近 4 倍长的岁月。与后一段演化进程相比，虽然在人类的知识中前一段演化进程有更多的朦胧，但毕竟相对历程较短，也许在大自然长期演化的总进程中，反而是比较容易完成的。我们有理由相信，地外早已有生命形成，或者有文明存在，只是由于空间和时间的阻隔，人类目前的认识能力还不足以确切探明它们究竟在哪里。人类的智能或地外文明的智能还会向前发展，激动人心的发现也许会出现在不远的将来。

11.3 地外文明探索的艰巨性

如果把地球的历史比作百岁老人，人类形成的历史才刚刚满月，而人类的宇航史还不到半分钟。现代所谓的宇宙航行，只是在太阳系范围内的行星际航行。宇航沿何种轨道，取决于飞行器的速度（见 4.4.1 小节）。宇航速度是靠火箭消耗燃料所产生的推力逐渐加上去的。假设推力产生的加速度是 9.8 米/秒^2，航天员离开地面时要承受两倍的重力，逐渐远去之后地球引力逐渐减弱。在燃料耗尽、火箭脱离以后，加速停止，飞行器进入轨道。轨道运动的惯性离心力与行星际空间的引力相平衡，或者说飞行器只在引力的作用下作轨道运动，航天员处于失重状态。如果速度超过第三宇宙速度（地球轨道附近为 16.7 千米/秒），飞行器便可以越出太阳系，进入恒星际空间，但这时的飞行器已完全处于失控状态，一去不能复返。即使沿着最佳设计的轨道飞出太阳系，它也只能在恒星际空间以等速直线运动飞行，直至进入另一个恒星的引力作用范围。这个过程按人类目前实际能力所能给予的最高速度计算，至少也需要数万年。要提高速度，必须延长

不断加速的时间，但如果没有足够的能量补给，长期加速是不可能的。

假设宇宙飞船有能力以 10 米/秒^2 的加速度长期不断地加速，达到第三宇宙速度只需 28 分钟。坚持加速一年，速度将超过光速，而这是狭义相对论所不允许的，在此之前，宇宙飞船上时空的性质早已发生了相对论性质的变化。相对论告诉我们，宇宙飞船的速度将增大到接近于光速而不可能达到光速。由于“钟慢”原理，宇宙飞船上的时间将过得比地球上慢；由于“尺缩”原理，宇宙飞船飞越的空间尺度也比地球上测量出的距离短。用相对论公式计算，上述宇宙飞船以长期不断加速的方式飞行，按宇宙飞船上的时间，2.5 年即飞到了最邻近太阳系的恒星比邻星（从地球上测定的距离是 4 光年），此时的宇宙飞船速度为 0.949 光速。经过大约 4.5 年的飞行，太空飞船飞出了 40 光年；持续飞行 10 年能到达银河系中心，但这时地球上的人已经度过了 15 000 年。当宇宙飞船经过 25 年不断加速的航行，行程 300 亿光年绕宇宙一周又回到太阳附近时，太阳早已不复存在，变成了黑矮星！这种异想天开的长期加速飞行是不可能实现的，因为长期加速需要长期的能量供应。不管储备什么样的燃料，都无法长期维持加速，燃料越多，宇宙飞船的自重越大，维持加速所需的能量越大。按广义相对论，物质转化为能量的最高效率为 $E=mc^2$，上述宇宙飞船即使想出了产能效率最高的方法，用消耗自身质量的方式来换取能量，宇宙飞船在到达银河系中心时消耗所剩的质量只有出发时的 1 000 亿分之一，带去的是一座大山，到达时只剩下一抔黄土！如果用延长时间来换取速度或加速度，设计一种宇宙飞船用 40 年时间往返比邻星，所需携带的能量是目前全球人类年消耗能量的 1 000 倍，也就是说人类完全停止消耗 1 000 年所积攒的能量仅够拜访最近邻居的一次旅行！比邻星是耀星，而且是三合星的成员，即使有行星环绕，也不可能有生命存在。为寻找地外文明而去探访也是徒劳的。何况以目前人类所掌握的科学技术水准，还不能预见恒星际航行的任何可能性。

整个银河系有 3 000 亿颗恒星，生命只存在于一部分恒星周围的具有相当条件的行星上。由于行星质量和体积比恒星小得多，自身又不发光，太阳系外的行星探测有非常大的难度。如果从 10 秒差距处观测太阳系，地球的视星等只有 28 等，相当于 25 万千米远处的一支烛光，用当前世界上最大的 10 米口径望远镜长时间曝光勉强可以观测到。但地球旁边的太阳角距离只有 0″.1，相当于 25 万千米远处的这支烛光旁边 100 米处有一盏光强 10 亿倍的巨型探照灯，直接用望远镜看到烛光的可能性是非常非常小的。

天文学家探测行星，用的是间接的方法。一种是测量恒星的周期性微小运动。如果存在行星，恒星本身会受到周围行星系统摄动力的影响而做微小的周期性运动，使恒星的自行不走直线而呈螺旋形起伏运动。研究这种运动可以推知行星的质量和轨道情况。天狼伴星就是用这种方法发现的。产生摄动力的天体如果

质量小于 0.05$M_{\odot}$，它不可能是恒星。质量越小，身为行星的证据越充分；但质量越小，摄动影响也越小，探测难度就越大了。另一种方法类似分光双星的研究方法，观测恒星光谱的多普勒效应，寻找恒星受行星系统摄动产生的微小视向运动而发现行星。天狼伴星和分光双星都是恒星，质量足够大，而行星的质量要小得多，摄动效应要小得多，因而观测难度要大得多。还有一种方法是测量恒星亮度的微小变化。当围绕恒星运动的行星遮掩恒星的一部分辐射时，亮度会有所减弱，用高灵敏度测光技术测量亮度减弱的周期和幅度，也可以推测行星系统的情况。其他的方法有高灵敏度的红外辐射探测和高分辨率的干涉测量，或者利用微引力透镜效应等。但无论何种方法，难度都非常大。

探测太阳系以外文明是否存在的另一种手段——人们寄予厚望的手段，是进行通信联络。地球文明已在全球广泛使用的广播、电视、通信、导航等无线电信号，虽然都是为地面接收的目的而发射，但肯定会有一部分泄露到太空中。特别是全球民航和军事设施的大功率探空雷达发射的信号，都会穿透大气层进入太空。几十年前发射的这些信号，现在已到达几十光年以外，如果在此范围内存在与地球人同等发展水准的文明世界，他们应当有能力截获这些信号而探测到地球文明的存在。同时，由他们那里泄露出来的文明信号，也应为地球所接收。那么，相互进行定向联络就有可能实现了。天文学家正是抱着这种希望利用大型射电天文望远镜和多信道接收技术，从天空各处监听来自地外文明的信息，然而至今一无所获。

有生命存在的行星，表面温度和气压条件应当允许液态水的存在，地球表面的这个条件是 10 万帕下气温 0～100℃。满足同等条件的行星，距离恒星不能太远也不能太近，还得有适当的自转和公转，对行星自身的质量和大气的成分及密度都有一定的要求。此外还要求行星表面的物理环境有足够长的稳定时间，允许来得及完成从化学演化到生物演化进而发展为高度文明的缓慢历程。这样的行星条件是相当苛刻的。一般说，光度特别大的恒星，自身寿命不足 10 亿年，光度特别小的恒星，能量供应不够充分，只有类似太阳质量的恒星拥有地外文明存在的可能性。太阳是单星，而银河系中一半以上的恒星属于双星或多星系统。在这类系统中行星轨道难以稳定，随时有遭撞击或被摄动力抛出轨道的可能性，存在生命或文明的可能性极小。据最粗略的估计，在银河系 3 000 亿颗恒星中，有条件拥有生命的恒星只占 1%，总数约 10～30 亿颗。在这些恒星周围，行星上的文明发展到与我们同等发达阶段，有能力互通信息，而且能达到相互通译的程度，这样的机会更是稀少。只要想一想地球上异国文化和古今文化相互通译的困难程度，就不难意识到宇宙文明之间信息交流的艰巨性。据粗略的概率估算，具有相互通信联络可能性的地外文明在银河系中总数为 50 万个，假设大致呈均匀分布，彼此间的最近距离为 600 光年。若果真如此，信号往返一次至少需时

1 200 年！

11.4　已作出的探测努力

11.4.1　系外行星的探测

太阳系外存在行星的情况，自 20 世纪 60 年代以来，已出现一些实际观测的成果。但在早期，因受测量精度的限制，只能说是提供了有意义的线索，或者说找到了一批太阳系外存在行星的可能的证据。最早的一例是蛇夫座的大自行恒星巴纳德星，1963 年美国天文学家范德坎普（van de Kamp）宣布发现了巴纳德星拥有两颗行星 B1、B2，质量分别为 0.7 和 0.5 个木星的质量，公转周期 12 年和 26 年，轨道半径 2.7 和 3.8 天文单位。他是通过研究巴纳德星的自行变化得出这一结论的。1973 年有人再次研究过巴纳德星的自行运动，但未能证实这一结论。20 世纪 70 年代，距离太阳 11 光年、视星等 5.2 的天鹅座 61 星被宣布为可能拥有一颗相当于 8 倍木星质量的行星，公转周期 4.8 年。另外两例被认为可能存在类木行星的恒星是 lalande 21185 和波江座 ε。1983 年发射的红外天文卫星 IRAS 发现，包括织女星在内的数十颗恒星周围存在由行星前物质组成的尘埃盘，提供了可能存在行星的迹象，其中比较突出的例子是绘架座 β。这是一颗 A 型主序星，亮度 3.85 等，距离 63 光年，年龄大约 1 亿年，地面红外观测已经得到了呈颗粒状的星周尘埃盘图像。1994 年 6 月，瑞士日内瓦天文台的天文学家迈耶（M. Mayor）和他的研究生夸洛兹（D. Queloz），根据哈勃望远镜拍到的绘架座 β 尘埃盘的侧面像，提出可能存在行星的证据（光盘图 11.4.1　绘架座 β 的星周盘）。1994 年 12 月，英国《自然》杂志文章指出，经光谱分析和天体力学数值分析，至少有两颗行星绕绘架座 β 公转。IRAS 发现有星周尘埃盘的恒星显微镜座 AU，距离 32.4 光年，与显微镜座 AT-A 及 AT-B 组成三合星。显微镜座 AU 是红色主序星，质量 $0.5M_{\odot}$，半径 $0.66R_{\odot}$，星周盘比海王星轨道还要大许多。还发现有星周尘埃盘的恒星后发座 HD107146，距离 88 光年，G2V 型，质量与太阳相当（光盘图 11.4.2　显微镜座 AU 和 HD107146 的星周盘；光盘图 11.4.3　显微镜座 AU 的行星假想图）。1984 年 5 月，美国基特峰天文台发现一颗距离 21 光年的 17 等暗星 VB8 有暗伴星，距主星约 6.5 天文单位，可能是一颗行星。

1995 年，物理学家研制出来新型阶梯光栅，天文学家立即应用这项技术提高视向速度的测定精度，使发现太阳系外行星的工作得到了比以前可靠得多的结果。第一例可靠的结果是 1995 年 11 月，迈耶和夸洛兹在《自然》杂志发表文章，宣布发现了飞马座 51 星有一颗相当于半个木星质量的行星，公转周期 4.23

天，轨道半径 780 万千米，只有水星轨道的 1/8。他们是用新技术测定视向速度微小变化的方法做出这一发现的。飞马座 51 星，光谱型 G5 V，质量 $1.06M_\odot$，半径 $1.15R_\odot$，亮度 5.5 等，距离 50 光年，是一颗与太阳类似的主序星，年龄至少 10 亿年。飞马座 51 星否还有类似地球的行星？现在还不知道，有待于以后的发现。不久，美国天文学家也用测定视向速度微小变化的方法，发现了另外两颗恒星周围各有一颗行星：室女座 70，距离 78 光年，质量 $1.1M_\odot$，半径 $1.76R_\odot$，行星 7.4 倍木星质量，轨道半径 0.48AU；大熊座 47，距离 44 光年，质量 $1.03M_\odot$，半径 $1.05R_\odot$，行星 2.5 倍木星质量，轨道半径 1.96 天文单位。光盘图 11.4.4 是飞马 51、室女 70 和大熊 47 的行星与太阳系行星比较图（光盘图 11.4.4 一些恒星的行星比较图）。

天文学家热衷于探测年轻恒星或像太阳这样的中年稳定恒星周围的行星系统，但令人惊异的是作为恒星遗骸的脉冲星周围也发现了行星存在的迹象。1992 年 1 月，英国《自然》杂志报道有两颗行星围绕脉冲星 PSR1257＋12（室女座）公转。同年 5 月美国《天空与望远镜》、1994 年 4 月美国《科学》周刊、1995 年 3 月美国《太平洋天文学会会刊》都先后报道了经 305 米射电望远镜的观测分析，这颗远离我们 978 光年的脉冲星有三颗行星在绕转，2002 年又发现 1 颗，共有 4 颗行星，轨道半径为 0.19 、 0.36 、 0.47 和 2.7 天文单位；质量分别为 0.025、4.3、3.0 和 0.000 4 倍地球质量。这两组数据与水星、金星、地球和冥王星相接近。这也许不是巧合，说明不论在恒星早期或晚期，行星系统都遵循同样的力学机制。即使在恒星超爆塌缩以后，未受殃及的原有行星仍然绕着它旋转，当然轨道会有很大变化。1996 年还发现脉冲星 PSRB1620-26 有 1 颗 2.5 倍木星质量的行星，轨道半径 23 天文单位，位于天蝎座，距离 12 000 光年。1999 年 4 月，来自英澳天文台和加利福尼亚大学的天文学家们宣布，发现了距太阳 52 光年的仙女座 U（音 upsilon）星周围有三颗行星，其质量分别为 0.69、1.89 和 3.75 倍木星质量，轨道半径 0.059、0.829、2.53 天文单位，公转周期 4.6、242 和 1 284 天。仙女座 U 星是一颗 4 等星，晴夜用肉眼即可看见，其温度、质量和体积都和太阳差不多。这是人类最早发现的与太阳系类似的另一个行星系统。

2004 年发现距我们 42 光年的巨蟹座 55 有 4 颗行星：巨蟹座 55e、b、c、d，质量各相当于 11 个地球，0.824、0.169 和 3.835 个木星；轨道半径 0.038、0.115、0.24 和 5.77 天文单位；公转周期 2.82、14.65、44.34、5218 天。2007 年又增加一颗：巨蟹座 55f，质量 0.144 个木星；轨道半径 0.781 天文单位；公转周期 260 天。巨蟹 55 是一对双星，主星 G8V 型，$1.03M_\odot$；$1.15R_\odot$；伴星 M4 型，相距 1 065AU（光盘图 11.4.5 巨蟹座 55 的行星假想图；光盘图 11.4.6 巨蟹座 55 双星的照片）。巨蟹座 55 五行星系统，是迄今发现行星最多

的系统。

斯必泽望远镜发现金牛座 CoKu Tau4 可能有 1 颗如木星质量的行星，并带有光环。该恒星只有 100 万岁，距离我们 420 光年（光盘图 11.4.7　金牛座 CoKu Tau4 的行星假想图）。

哈勃望远镜发现飞马座 HD209458 拥有行星，2004 年 12 月 6～7 日，发生了行星掩食恒星的现象，斯必泽望远镜记录下掩食造成的恒星亮度的微小变化，据此算出行星具有 0.685 倍木星质量，1.35 倍木星半径，轨道半径 0.047 天文单位，轨道周期 3.525 天。恒星光谱型 G0V 型，表面温度 5 942 开，距离 153 光年（光盘图 11.4.8　飞马座 HD209458）。2004 年 10 月 31 日还拍摄到，天琴座 TrES-1 行星掩食恒星的亮度微小变化曲线，并计算出行星具有 0.61 倍木星质量，1.04 倍木星半径，轨道半径 0.039 3 天文单位，轨道周期 3.03 天。恒星光谱型 K0V 型，$0.87M_{\odot}$，$0.82R_{\odot}$，表面温度 5 250K，距离 512 光年。光盘图 11.4.9 上半给出了 TrES-1 的亮度变化曲线；下半给出了 HD209458 的亮度变化曲线。此图是 2005 年 3 月 22 日公布的（光盘图 11.4.9　行星掩恒星时的亮度变化）。

织女星是令我们中国人感到亲切的亮星，斯必泽望远镜拍到的织女星近照，左边是在 24 微米波段，右边是在 70 微米波段（光盘图 11.4.10　织女星的红外图像）。由微米级尘粒组成的织女星星周盘，延伸 800 天文单位（比海王星轨道大 26 倍）。据推测，这些尘粒是它的行星相互碰撞产生的（光盘图 11.4.11　织女星的行星相互碰撞想象图）。

2004 年 4 月，欧南台的 8.2 米望镜远镜拍到半人马座[①]中的一颗褐矮星 2M1207a 的照片，光度和质量都较小，介于恒星与行星之间，距离 171 光年。在其不远处的红色暗点是一颗行星，它的红外谱线中有水分子成分。光盘图 11.4.12 不是美术加工图，而是第一张系外行星的照片（光盘图 11.4.12　第一张系外行星的照片）。2M1207a 的质量为 $0.025M_{\odot}$，约 26 倍木星质量，光谱型 M8，视星等 20.15 等，2M1207b 约 4 倍木星质量，1.5 倍木星直径，二者亮度相差 100 倍，相距 46 天文单位。

2005 年 6 月 13 日，美国 10 米凯克望远镜，分析恒星受到引力扰动的情况发现一颗 5.7 倍地球质量的行星，围绕 M4V 型矮星 Gliese 876 的公转，周期只有 1.938 天，与恒星相距 0.021 天文单位。估计表面温度为 200～400℃，因此它不可能是气体状态，而应具有类似地球那样的硬壳。Gliese 876 位于宝瓶座，距离 15 光年，视星等 10.17 等，0.32 太阳质量，0.36 太阳半径，表面温度 3 350开。2000 年曾发现它有 2 颗木星级质量（0.56 和 1.935）的行星，轨道周

① 2M1207 是 2MASSWJ1207334-393254 的简写，又名 TW Hydrae，即长蛇座 TW 星。但从它的位置数据：赤经 12 时 07 分 33 秒，赤纬-39 度 32 分 54 秒，查现代星图，应当位于半人马座。

期分别为 30 天和 61 天，与恒星相距 0.13 天文单位和 0.21 天文单位。这是一个三行星系统。

2005 年 7 月 14 日英国《自然》杂志刊登，美国 10 米凯克望远镜发现，天鹅座 HD188753 有 1 颗行星，1.14 木星质量，轨道周期 3.35 天，距恒星0.044 6 天文单位。奇特的是，这颗恒星是一组三合星，距离太阳 145 光年。主星 1.06 太阳质量，绕一对双星运动，轨道近点 6.2、远点 18.5 天文单位，周期 25.7 年，一对双星 1.63 太阳质量，相距 0.66 天文单位，绕转周期 155 天。孤独的行星虽然只绕主恒星公转，但一定会受到另外两颗“太阳”的引力干扰。

2005 年发现狐狸座 HD189733 有 1 颗行星，1.13 木星质量，1.138 木星半径，轨道周期 2.22 天，距恒星 0.031 天文单位。恒星距离 63 光年，星等 7.76 等，$0.8M_{\odot}$。2007 年哈勃望远镜发现行星大气中有 CO_2 成分。

2006 年 1 月 25 日，用微引力透镜效应法发现 1 颗 5.5 倍地球质量的行星，围绕天蝎座恒星 OGLE-2005-BLG-390L 旋转，轨道周期约 10 年，轨道半长径 2.6 天文单位。恒星光谱型 M4，距离 2.15 万光年，接近银河系中心。

2007 年被美国《时代》杂志评为 10 大科技成果之一的项目是 3 个有大气的行星被发现。分别是：WASP-3、WASP-4、WASP-5；它们的恒星分别位于天琴座、凤凰座、凤凰座；距离 727、850、967 光年；质量 1.24、0.9、$0.97M_{\odot}$。三颗行星分别是：1.76、1.12、1.58 木星质量；1.31、1.42、1.09 木星半径；距离恒星 0.030、0.023、0.027 天文单位；公转周期 1.85、1.34、1.63 天；大气温度 1 983、1 678、1 717 开。WASP 是广角行星探测设备“wide angle search for planets”的英文缩写。（光盘图 11.4.13 WASP 广角行星探测设备），西班牙拉帕尔马欧洲北方天文台和南非天文台各有一台 WASP，8 厘米×20 厘米广角望远镜，7°.8×7°.8 视场，用高灵敏度测光技术发现行星遮掩恒星的现象（光盘图 11.4.14 行星遮掩恒星示意图；光盘图 11.4.15 WASP-3 的行星遮掩恒星光变曲线）。

2007 年被中国两院院士评为 10 大科技成果之一的项目是发现恒星 Gliese 581 有 3 个质量接近地球的行星。分别是：Gliese 581b、Gliese 581c、Gliese 581d。它们质量分别是：15.6、5.0、7.7 地球质量；距离恒星 0.041、0.073、0.25 天文单位；公转周期 5.368、12.932、83.6 天。恒星 Gliese 581 位于天秤座，光谱型 M3，距离 20.4 光年；质量 $0.31M_{\odot}$（光盘图 11.4.16 Gliese 581 三行星系统示意图）。

2007 年欧洲南方天文台 8 米望远镜拍到蝘蜓座 CT 星的红色小伴星，一年后被认定为是一颗行星，17 倍木星质量，2.2 倍木星半径，距恒星 440 天文单位。而恒星蝘蜓座 CT 亮度 12.36 等，光谱型 K7，距离 538 光年（光盘图 11.4.17 蝘蜓座 CT 及其伴星的假彩色图像）。

2008年6月16日在瑞士日内瓦宣布，通过在欧洲南方天文台3.6米望远镜5年的观测研究，发现两组三行星系统和一组两行星系统，共8颗行星，其中有4颗质量小于10倍地球。第一组绘架座HD40307的3颗行星质量均接近地球，分别是：4.2、6.87、9.16地球质量；距离恒星0.047、0.081、0.134天文单位；公转周期4.311、9.62、20.46天。HD40307距离41.7光年，光谱型K2V，视星等7.17等，表面温度4 977开（光盘图11.4.18　HD40307三行星系统示意图）。另一组三行星系统孔雀座HD181433，距离85.2光年，光谱型K3Ⅳ，视星等8.38等，质量0.78$M_{\odot}$，表面温度5675开。三颗行星分别是：7.6地球质量、0.64、0.54木星质量；距离恒星0.08、1.76、3天文单位；公转周期9.4天、2.63、5.95年。两行星系统大犬座HD47186，距离123光年，光谱型G5V，视星等7.8等，质量0.99$M_{\odot}$，表面温度5 675开。两颗行星分别是：22.8地球质量、0.351木星质量；距离恒星0.05、2.395天文单位；公转周期4.085天、3.71年。

2008年9月，美国10米凯克望远镜拍到恒星HR8799周围三颗行星的合影照片，这是迄今第一张多行星系统的直接照片（光盘图11.4.19　HR8799的三颗行星合影照片），用近红外自适应光学系统拍摄。中央假彩色图像是已被遮掩而残留的、经过处理的恒星像，外围3颗小红点是3颗行星。恒星HR8799位于飞马座，距离128光年。光谱型A5V，视星等5.96等，质量1.5$M_{\odot}$。三颗行星分别是：HR8799d、HR8799c、HR8799b；10、10、7木星质量；1.2、1.2、1.1木星半径；距离恒星24、38、68天文单位；公转周期100、189、465年。

2008年11月，欧洲南方天文台8米望远镜再次拍摄绘架座β，使用日冕仪技术，挡住亮约1000倍的恒星，居然显露出行星的图像（光盘图11.4.20　绘架座β的行星图像）。这颗行星8倍木星质量，距恒星8天文单位，公转周期16.43年。

2008年11月13日，美国加州大学伯克利分校的保尔·卡拉斯（Paul Kalas）研究团组，发布了恒星北落师门有行星环绕运动的照片。有关文章发表在11月14日出版的美国《科学》周刊上。这是人类首次实际观测到系外行星绕恒星运动的踪迹（光盘图11.4.21　行星绕恒星北落师门运动的踪迹）。照片中央的白色亮点就是全天第18亮星北落师门，恒星周围的红色光影区是围绕恒星运动的小天体带或尘埃盘。右下角小方框的放大图中显示出一颗行星北落师门b绕恒星运动的轨迹：2004和2006年两次照相，处在不同的位置上。

北落师门位于南鱼座，1.16星等，光谱型A3V，是黄道上四颗著名亮星之一（另三颗是金牛座毕宿五、天蝎座心宿二、狮子座轩辕十四），质量为太阳的2.06倍，直径为太阳的1.82倍，距离我们25光年，表面温度8 540开。它到太阳的距离之近，在所有恒星中排第80位。西方称之为Fomalhaut，阿拉伯原文

意为“鱼的嘴巴”。深秋时节，在我国纬度 50°以南广大地区都可以在飞马座以南、宝瓶与摩羯之间见到它（光盘图 11.4.22 北落师门在星座中的位置）。北落师门 b 距恒星 115 天文单位，公转周期 872 年，质量约为 3 倍木星质量。北落师门虽然年轻，但预计寿命较短，只有太阳的 1/10。北落师门虽然温度较高，发出的热量比太阳大 10 倍，但由于北落师门 b 离恒星太远，不大可能有生命存在。

截至 2009 年 2 月 18 日已发现系外行星 340 颗，有 5 颗属于脉冲星，1 颗在河外。大多数都是用间接方法发现的。收获最多的是“视向速度”法，即从恒星光谱线的微小偏移测量，发现恒星与行星之间的相对绕转运动，共发现 314 颗。其次是“亮度变化”法，也叫“凌星”法，即测量行星从恒星表明前方通过时，恒星亮度所起的微小变化，共发现 57 颗。再次是“干涉测量”法和“微引力效应”法，共发现 26 颗。有 57 颗是被重复发现的。直接拍到行星图像的只有 10 颗，拍到行星运动踪迹的仅北落师门 b 一例而已。

所有已发现的系外行星，质量大多都在木星级范围，质量小于 10 倍地球的只有 10 颗（脉冲星拥有的行星不算），被称为“超级地球（Super-Earth)”。最小的 3.3 倍地球质量，位于人马座，距离 3 200 光年，由“微引力效应”法发现。2009 年 1 月 9 日发现一颗“超级地球”HD7924b，9.22 地球质量，距离恒星 0.057 天文单位，公转周期 5.4 天。恒星 HD7924 位于仙后座，视星等 7.2 等，光谱型 K0V，距离 54.8 光年，表面温度 5 177 开。真正的“类地行星”应在 1.3 地球半径以下。它们的发现，还在人们的期待之中。天文学家寄望于已在 2009 年 3 月 7 日发射的 Kepler 探测卫星，2012 年发射的新一代天体测量卫星 GAIA，2013 年发射的新一代空间望远镜 JWST 和 2020 年发射的类地行星搜寻者 TPF，不仅探测行星，还要探测这些行星上是否有大气和水，氧、二氧化碳、甲烷等与生命有关的气体物质。

表 11.4.1 已发现的小于 10 倍地球质量的系外行星

行星名	发现年	行星质量/地球	发现方法	所在星座	距离/光年	恒星质量/太阳
MOA-2007-BLG-192-Lb	2008	3.3	微引力	人马	3200	0.06
HD40307b	2008	4.20	视向速度	绘架	41.7	?
Gl581c	2007	5.02	视向速度	天秤	20.4	0.31
OGLE-05-390Lb	2005	5.40	微引力	天蝎	21000	0.22
Gliese876d	2005	5.72	视向速度	宝瓶	15.4	0.32
HD40307c	2008	6.87	视向速度	绘架	41.7	?
HD181433b	2008	7.57	视向速度	孔雀	85.2	0.78
Gl581d	2007	7.73	视向速度	天秤	20.4	0.31
HD40307d	2008	9.16	视向速度	绘架	41.7	?
HD7924b	2009	9.22	视向速度	仙后	54.8	0.83

11.4.2 信号的监听与发送

当代射电天文学的技术能力，包括灵敏度、分辨率及数据采集、分析能力都已达到了可以与较近的地外文明通信的程度。

如果地外文明的信号发射功率为 1 000 兆瓦，用世界上最大的 305 米射电望远镜天线可以接收到 18 光年以内的联络信号。如果发射功率提高到 100 万兆瓦，则可以接收到 580 光年以内的联络信号。在定向发射的情况下，还可以大幅度降低对发射机功率的要求。以人类当前的技术能力，应当是可以实现的。

人类向地外文明主动发射联络信号，可以选择传递效率最高的电磁波段，尽量避开银河系磁场中相对性运动引起的低频非热辐射背景噪声，尽量避开由太空电离氢的吸收而产生的量子噪声，通信信道宜选在 1 000 兆赫（波长 30 厘米）至 6 万兆赫（波长 5 毫米）之间。这一波段被称为“自由空间的微波窗”或“没有天然噪声的安全谷”。当然，2.7 开的宇宙微波背景辐射噪声是无法避免的。在所选的波段中，有两处宇宙中天然存在的而且分布很广、有相当强度的射电辐射，一处是波长 21 厘米（1 420 兆赫）的中性氢（H）原子谱线，另一处是波长 18 厘米（1 667 兆赫）的羟基分子谱线（见 8.4）。地外文明中的天文学家也一定会像地球上的天文学家一样注意到这两种天然的宇宙射电辐射，因而加强他们的接收技术，在太空四处搜索。如果人类利用这两个波长，编织地球文明的信号，持续发送，应当容易被地外文明接收并翻译而达到通信的目的。由于氢和羟基结合在一起就是水，因此 18～21 厘米这一狭窄频带，被戏称为“水洞”。生命与水结下了不解之缘：地球上的生命原本从水中得以哺育；寻求地外文明也对“水洞”寄予厚望。

国际天文学联合会第 51 专业委员会是地外文明探索 SETI（Seach for Extra-terrestrial Intelligence），负责与地外文明通信联络的活动。第一个被执行的计划被称为奥兹玛（OZMA）计划，由美国国家射电天文台的德雷克（F. Drake）负责。1960 年 5 月开始用一台 26 米口径的射电望远镜对 2 颗距太阳很近的恒星鲸鱼座 τ 和波江座 ε，通过 21 厘米波段，在三个月内监听了 200 个小时，结果一无所获。这两颗星的距离分别为 11 光年和 12 光年，不仅温度、光度和质量与太阳相似，而且年龄也和太阳差不多。该计划还用 NRAO 的 90 米直径射电望远镜对天鹅座 61 星及巴纳德星发送了大功率的 21 厘米谱线信号，并于 1970～1971 年对 10 颗可能有行星存在的天区发送了更大功率的联络信号，设计了比原有设备灵敏度提高 100 万倍的信号接收机监听对方的回音，但至今没有收到消息。1988 年 11 月 15 日，这台 90 米直径射电望远镜突然坍塌，变为一堆废铁，寿命 26 年（光盘图 7.3.7；7.3.8）。有人戏谑地说：这是外星人对偷窥者的报复。2000 年 NRAO 建成直径 110 米的射电望远镜，取代了它的位置，性能更加优越，工作

波段延伸至毫米级。1974年11月16日，世界上最大的口径305米美国阿雷西博射电望远镜对准武仙座球状星团M13方向，发出了地球文明的联络信号。信号内容为太阳系概况、人类生命的化学基、人体的形态与尺度、地球上的人口等，采用二进制编码脉冲形式，数据点数为两素数乘积23×73＝1 679，信号总长历时3分钟，希望能被地外文明接收和理解。M13是银河系中恒星最密集的星团之一，星数在30万颗以上，哪怕其中只有1颗恒星拥有地外文明，能收到来自地球的信息，也是人类盼望之所归。不过M13距离太阳系2.5万光年，信号往返至少需要5万年！

1972年美国宇航局的一个小组曾提出一份名为“Project Cyclops”（Cyclops为希腊神话中的独眼巨人）的计划，用1 026面口径100米的天线，广为探测1 000光年以内的微波信号或更遥远的强发射信号，希望截获来自地外文明的消息，计划投资60亿美元，工期10～15年，但最终没有得到政府的支持。

1992年10月12日，美国NASA开始执行另一项大规模探索计划，名为“高分辨率微波巡视”（HRMS），使用包括阿雷西博望远镜在内的世界上一些最大的射电望远镜，对100光年以内的800～1 000个类似太阳的恒星，逐个进行扫描，使用每秒钟10亿次以上的专用计算机，每秒钟巡查1 000万个频道，接收机能同时对200万个带宽为20赫兹的频道进行分析，区分出接收到的究竟是自然界的辐射还是地外文明发出的信号。1993年10月，作为削减预算赤字的一部分，美国国会终止了财政拨款，这项计划被停止执行。

在HRMS计划被迫中止执行之后，美国加利福尼亚州SETI研究所在民间资助下又激活了名为“凤凰”（phoenix）的计划，截至1995年底，用澳洲的64米口径射电望远镜，在短波波段（1 745～3 005兆赫）对105颗星进行了1.3万次观测，在长波波段（1 195～1 745兆赫）对206颗星进行了1万次观测。在总共2.3万次观测中，几千种接收到的信号被认证为环境干扰，只有近百种信号尚待进一步确认，但没有检测到任何可能是地外文明的信号。1999年SETI启动“SETI@home”计划，发动全世界各行业人士，通过国际互联网，获得包括阿雷西博望远镜在内的有关SETI的数字信号进行分散分析，从中筛选有用信号。实时与设在美国伯克利大学的网站联络。其网址为 http://setiathome.ssl.berkeley.edu。该计划已吸引数十万人参加。有兴趣的本书读者不妨一试。

中国正在贵州省喀斯特地形山区建造500米口径射电望远镜（FAST），2013年建成，其工作目标之一也是探测地外文明。中国还提出一种可能是：建造单台1 000米口径，或30台200米口径的球面天线，进行综合孔径观测（详见7.6节）。

1972年、1973年美国发射的先锋10号和11号行星际宇宙飞船，带有14厘

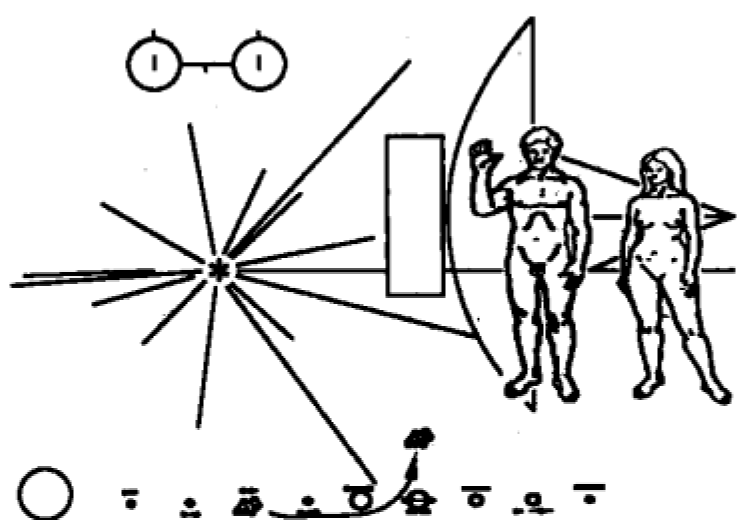


图 11.4.23　随先驱者飞出太阳系的地球文明信息

米×22.5 厘米的镀金铝板，上刻用二进制编码的有关太阳系和地球的各种信息，还有男、女地球人的裸像（图 11.4.23），1984 年已飞出太阳系。1977 年 8 月、9 月发射的旅行者 1 号、2 号行星际宇宙飞船带有更多的音像资料包括地球上的天象、环境、人体及各种自然界、动物和人类的声音，其中还有巴赫、莫扎特的音乐作品和中国古典音乐《高山流水》，也已飞出太阳系，向恒星际空间进发，希望有朝一日为地外文明截获。这是人类第一批发往遥远恒星际的实物信息，探寻着太阳系外人类的知音，代表人类不懈的探索精神。

人类已经和正在作出努力苦苦求索地外文明之光。日趋先进的技术、方法以及科学思想上的积累，预示着未来成功的希望。理性告诉我们，地球不是宇宙中的特殊天体，生命发生的条件并不特别苛刻，地球文明不应是宇宙的独生子，人类应当有尚未寻访到的知音。努力在继续着……

11.5　太阳系内的地外生命问题

近 40 年来，人造飞行器对太阳系的考察已经明确，像地球文明这样高度发达的生命形式，在太阳系内的其他天体上是不存在的。但人们并没有放弃考察，在太阳系范围内有没有低级的生命形式存在。在所有太阳系的行星卫星中，人类亲自登临的毕竟只有离地球最近的月球，即使对月球也只进行了有限区域、有限时间、有限手段的实地考察，还有许许多多未知的领域等待着人类进一步地去探索与研究。

11.5.1　月球水冰的发现

美国和苏联的月球探测器着陆地点以及航天员登月的区域，都在月球赤道附近。对两极知之甚少。因为月球自转轴与轨道平面的交角为 83°19′，几乎没有倾斜（详见 2.6.1 小节），所以月面上没有四季温度的变化。两极地区终年不见阳光，又没有大气参与温度对流平衡，所以月球阴冷的两极温度低到 −230℃。1994 年美国宇航局发射的克莱门汀号宇宙飞船带有高灵敏度的传感雷达。1996 年，一个科学家小组在分析克莱门汀号对月球的考察信息时，发现月球南极的一个盆地中可能存在大量的水冰与泥土混在一起。为了探明究竟，1998 年 1 月，美国发射了“月球勘测者”绕月极轨卫星，118 分钟飞行一圈，在月面 100 千米

上空对月球两极及整个月面进行了详细考察，进一步明确了月球南、北两极存在大量水冰与泥土混合的情况。1998 年 5 月发表的探测报告，指出在月球南极 650 千米^2、北极 1 850 千米^2 范围有水冰约 66 亿吨，与石头、泥土混合在一起。当"月球勘测者"工作 1 年半以后，即将结束使命时，轨道已下降到离月面只有 30 千米高度。1999 年 7 月 31 日，在地面指令下，进行最后一次撞击月球南极的实验，希望能够产生撞击出来的水分子或氢氧离子的频谱信息，证明确实存在水冰。然而，通过地面望远镜、宇宙飞船和哈勃太空望远镜的观测，都没有得到相关的证据。月球水冰的问题留下了有待证实的疑点。在月面其他地区，即使有过水冰也因阳光蒸发后变成水汽，逃逸到太空中，而两极温度极低，水冰才得以保存下来。当然月球上的水冰问题还有待于直接取样来证实。水冰的存在，并不能说明月球有生命存活，但它至少改变了人们过去以为的月球上滴水全无的荒漠印象，还为人类登月旅行提供了更有现实可能性的希望。月球水冰的考察被中国科学家评为 1998 年世界十大科技新闻的第一条。

11.5.2 对火星生命的探测

如果地球以外的太阳系行星上有生命存在，那么最具备条件的应当是火星。火星半径约为地球半径的 53.2%，质量为地球质量的 10.74%。火星自转周期是 24.6 小时，倾角 25°12′，所以昼夜长短和四季及气候带分布几乎与地球完全相同。只是公转周期较长，一年有 680 多个昼夜。火星大气层比较稀薄，只有地球大气密度的 1%，淡蓝色，主要成分是二氧化碳。火星离太阳稍远，所以比地球冷，热带温度在−67～20℃，极地温度达−167℃。昼夜温差很大，严重时变化范围超过 100℃。两极有很厚的白色冰层，称为极冠，冬季扩大，夏季萎缩。据 2007～2008 年凤凰号火星探测器的实地考察，可能会改变一直以来"火星极冠主要是二氧化碳干冰，水冰很少"的看法（详见 7.4 节）。

美国在 1962～1971 年共向火星发射了 6 个水手号飞行探测器，有 4 个获得成功。它们拍摄了火星表面 70%的照片。1975 年 8 月和 9 月美国又发射了海盗 1 号和 2 号两个探测器，分别于 1976 年 6 月和 8 月先后进入绕火星运行的轨道，飞行了 1 510 天和 719 天，拍摄了 5 万多张照片，并于 7 月和 9 月分别释放了两个着陆器在火星表面经度相差 180°的两个位置软着陆，各自工作 6 年多和 3 年半，共传回地球 300 多万份火星气象资料和 4 500 多张照片。但见火星表面地形复杂，有高山、盆地、峡谷、沙丘、平原，还有大量的环形山和陨击坑，最高山峰高达 3 万米。经常出现沙暴，尘沙蔽日，高达数百万千米，经久不息。却没有发现任何生命的痕迹和有机化合物存在的证据。美国科学院所作的十分谨慎的结论说："海盗号的探测结果，减小了火星上存在生命的可能性。"

1996 年美国宇航局宣布，从地球南极冰层中得到一块被命名为艾伦 84 001

的陨石，重 1.9 千克，是来自火星的样品，具有明显的火星岩石的特征，从中化验出含有多环芳香烃类的有机物（11.2.3）。这一信息虽未得到普遍认可，但再度激发了人类探索火星的热情。1996 年 11 月，美国开始新一轮的火星探测 10 年计划（见 7.4.8 小节）。前两步已经实施，目的是考察火星的地貌、岩石和气象情况，测定土壤深层和大气中的含水量。已发现火星表面有许多无水的干涸河床，宽几十米到数百米，长达数百千米，有干流有支流，还有大洪水冲刷过的痕迹。

2004 年欧洲空间局发射“火星快车”轨道飞行器，发回了长期受水流侵蚀的火星表面照片。同年登陆火星的美国勇气号和机遇号探测器，找到了更多火星曾经有水的证据。2007 年 8 月 4 日，美国宇航局发射“凤凰号”探测器，于 2008 年 5 月 25 日在火星北极地区着陆，主要任务是通过土壤的挖掘、分析，研究火星水的历史、火星气候的变迁和冰雪覆盖条件下生命存在的可能性（参见 7.4.8 小节）。

1996 年俄罗斯也发射了“火星 96”探测器，虽遭失败，但仍未放弃探测火星的计划。俄将与欧洲合作，继续进行火星探测。1998 年 7 月 4 日，日本的 M-5 大型固体运载火箭从鹿儿岛飞行中心起飞，把名为“希望者号”（原名“行星-B”）的火星探测器送入太空，准备对火星进行为期 2 年的考察，到 2003 年宣布以失败告终。中俄也将于 2009 年联合进行对火星空间环境的探测（参见 7.6 节）。

人类探测火星，最感兴趣的当然是火星究竟有没有生命的问题。现在的火星，荒漠、干燥、寒冷、缺氧、缺水，不适宜地球生命的生存。但是否在火星的历史上曾经有过潮湿、温暖、河流纵横的时代？如果那时孕育过生命，能否挖掘出一些遗迹？是什么原因造成现在的火星环境如此恶劣，成为死寂的世界？是否可能有与地球生命模式完全不同的“生命”存活在火星上？为什么火星与地球这一对太阳的孩子，彼此有很多相似之处，而一个生机勃勃，另一个寂寞荒凉？火星上曾经有过的大洪水，如今到哪里去了？地球的未来，会不会重蹈火星的覆辙？探索正在继续，预计新世纪的前 20 年，人类的足迹将踏上火星，对上述问题作一番详尽的考察。如果发现了与地球生命完全不同的另一种模式的生命，哪怕是最低级的生命，比如说它不是以碳、氢、氧为主要元素构成的，它对环境有与地球生命不同的另外一些要求，那么这将使人类对生命现象的认识，进入一个全新的境界，激发起人类更深入、更全面地认识自然界，认识宇宙，认识自己。如果发现的火星生命现象与地球上的生命现象模式相同，那么就有力地证明了生命现象无论在地球上还是在地外，都具有广泛的一致性，这无疑促使人类更加坚定了对生命本质的所有研究成果的自信心。如果最后确认，火星上不存在任何生命现象，那么人类将进一步思考：孕育生命的机制究竟是什么？地球上的生命真的只是宇宙中一种非常特殊的偶然现象吗？

11.5.3 对木星、土星及其卫星的考察

在太阳系各行星的卫星中，科学家们认为可能存在生命的是木卫二和土卫六。伽利略最早用望远镜观察木星时就发现了木星的四颗较大的卫星，依离木星远近排序为木卫一、二、三、四。木卫二比月球略微小一点，质量是月球质量的60%。1989 年美国发射的伽利略号木星探测器，于 1995 年 7 月到达木星附近，1996 年 3 月转入环绕木星的轨道，成为木星的人造卫星，用 8 种观测仪器对木星本体、各个卫星及周围磁场进行考察，于 1997 年 12 月考察结束，转入更远的环绕木星的轨道。2003 年 9 月 21 日，伽利略号探测器按预定计划撞向木星，结束了 8 年的木星探测使命。伽利略号发现，木卫二表面覆盖着白色冰层，有浅浅的纵横沟壑，很像地球两极的浮冰。在冰层下面可能存在液态水。估计冰盖厚度 8～16 千米，液态水深 80 千米以上。洋底还可能有火山活动，其提供的热量也许可以使水中某些不需要阳光和空气的微生物存活。

1997 年美国发射的"卡西尼号"土星探测器，2004 年到达土星附近，对土星及其卫星、光环系统进行考察。考察的重要目标之一是土星的第 6 个卫星——泰坦。它是太阳系中第二大卫星，直径 5 150 千米，仅次于木卫三，质量为月球质量的 1.8 倍，有厚厚的大气层，表面物理条件类似原始地球，其上是否有生命存在，也是人们十分关注的问题。"卡西尼号"携带的"惠更斯号"探测器于 2005 年 1 月 14 日向泰坦降落，90 分钟后完成了历史使命，葬身于泰坦卫星上。"惠更斯号"降落过程中发回的照片表明，泰坦上可能富含碳氢化合物冰块（参见 7.4 节）。

11.6 关于 UFO 现象

UFO（unidentified flying object），意为不明飞行物。早在 1878 年 1 月，美国得克萨斯州的一位农民在田间干活时，看见空中有一个圆形的飞行物体，不知为何物。此事被记者披露于报端后，有 150 家报纸相继转载，轰动一时。这可能是西方最早出现的 UFO 事件。1947 年 6 月 24 日，美国的一架飞机执行救难任务，寻找另一架失事的 C-46 运输机，在华盛顿伦尼山附近 3 500 米上空，飞行员发现前方有 9 个闪闪发光的耀眼物体，在山峦间曲折穿行，估计飞行速度不小于每小时 2 000 千米。新闻媒体根据飞行员口述广为报道，形容它们像水面上打漂的碟子，跳跃式地向前飞行，估计每个直径有 30 米左右，并称其为飞碟（flying saucer）。"飞碟"一词从此风靡于世。1948 年 1 月 7 日，一位美国飞行员驾机追踪他所发现的不明飞行物，结果机毁人亡。事后查明他追踪的是一只用于科学实验的高层大气探空气球。1952 年 7 月，美国华盛顿国际机场的雷达屏幕上

出现来历不明的飞行物，怀疑为来自苏联的侦察设备或某种秘密武器，结果虚惊一场。国家安全部门缜密的调查结果否定了此种可能性。但新闻媒体仍广为报道，并称其为“飞镰”（flying sickle），因为镰刀是苏联国旗上的标志之一。此后，美国和世界各地累有各种不明飞行物的发现报道。为了慎重对待类似事件，美国空军开始执行一项名为“蓝皮书计划”的任务，负责对发现的每一件 UFO 事件进行登记、调查和研究。1966 年 2 月，联邦政府组织一次大规模的集中调查，证实所发现的不明飞行物 90%为天文、气象、地球物理、大气光学或生物现象，包括亮恒星、流星、极光、离子云、地震闪光、鸟类或成群的昆虫，也有一些是飞机、气球等人造物体，当然也存疑一些无法解释的情况。

20 世纪 60 年代中期，亚利桑那气象部门的麦克唐纳（J. E. McDanald）和西北大学的海克（J. A. Hyeck）率先提出了外星人来访地球的可能性，并将 UFO 与外星人联系在一起。此说一出，很快便风靡全世界。关于飞碟或外星人的社会传闻有增无减，有的绘声绘影耸人听闻。五花八门的飞碟或外星人杂志及电视节目遍布世界各主要国家。1968 年，联邦政府又一次组织大规模集中调查。以科罗拉多大学物理学教授康登（E. U. Condon）为首的 37 位著名科学家组成调查组，对流传最广、影响最大的 59 起 UFO 事件进行深入的调查研究，写出了著名的《关于 UFO 的科学研究》学术报告，又称康登报告，1969 年由美国国家科学院的一个委员会鉴定通过并公开发表。报告的结论是：认为曾有地外文明来访地球的说法是没有根据的，所有 UFO 事件仍然属于天文、地球物理、生物等自然现象和在特殊条件下的人造物体。同时认为今后没有必要再进行类似的调查。至此，政府部门对 UFO 的关注画上了句号，美国空军的“蓝皮书计划”也停止执行，所登记的 UFO 事件共 12 618 件，以后不再登记。

民间关于外星人来访地球的传闻、报道、刊物、科幻和文艺作品在世界各地仍继续广为流传。其中有一些作品带有明显的渲染和神秘色彩，反而降低了事件本身的真实性。1999 年 8 月 16 日中国武汉市纷传 UFO 空中现身。后来查明，原来是华中科技大学所作的激光发射试验。国外的一些媒体多次报道外星人与美国总统或苏联领导人秘密交往，外星人被军方劫持，外星人的尸体被解剖等耸人听闻的消息，全都是无中生有的捏造。迄今为止，所有传闻和报道没有一件是被完全证实的。美国和英国的两家杂志各悬赏 100 万美元和 100 万英镑，征求关于外星人的真凭实据，至今竟没有一个人敢于应征。

从科学的观点来看，地外文明的存在是合乎逻辑的，但由于时间和空间的阻隔，地外文明与地球文明相互探访有极大的难度。人类目前掌握的技术能力还远不足以达到探访的目的。人类倘若有一天真正有能力飞向宇宙深处，寻找到地外文明，那一定是克服了重重困难、历尽千辛万苦之后才能实现。即使现在已有发展到超过地球文明的地外文明，他们的“飞碟”克服了时间、空间的障碍来到地

球附近，发现了他们千辛万苦想要寻找的宇宙知音，决不会像一些传闻和报道描述的那样，放弃同地球人的联系交往，又行踪诡秘地匆匆离去，做出种种不可理喻的行为。当然，也许在未来某个世纪的某一天，地外文明的使者真的来到地球人中间，或地球文明终于有能力建立起与久久企盼的宇宙知音之间的联系交往，那将是多么激动人心的特大新闻啊！

地外文明探索的专家们有一种认识：宇宙中的低级生命可能广泛存在，但进化到人类这样有高度智慧的生命只是凤毛麟角。正如 2008 年 10 月在北京人民大会堂作专题报告的杰弗里·马西（G. Marcy）教授所说："智慧或许并不被生命特别钟爱。昆虫不期望懂得数学，猫也不急着学会弹钢琴。"他还说，人类已经对沉睡了几十亿年的月球和火星仔细的搜寻过，并没有找到任何外星人访问过的痕迹；人类有很多台大望远镜，每天晚上都在密切的观测夜空，也从来没有发现过外星人的飞船或别的探测器发出的信号；人类主动发出探测地外文明的电波已经 48 年了，也没有得到任何回音。莫非"原始生命，普遍存在；技术生命，非常稀有？"但是，没有找到存在的证据，不等于找到了不存在的证据。在寻找地外文明方面，地球人永不言弃。虽然希望渺茫，还将不断的追求、探索。满怀信心和热情的不断追询：地球以外的生命和文明，你们究竟在哪里？



第 12 章　宇宙模型理论

道生一，一生二，二生三，三生万物。

天下万物生于有，有生于无。

——老子，《道德经》

要是一种科学异说被公众忽视或指责，它很可能是对的。要是一种科学异说受到公众的热烈支持，它几乎肯定是错的。

——艾萨克·阿西莫夫

我在回家的途中飞越怀俄明上空，大地在下面看起来柔软而舒适，浮云处处，公路纵横，夕阳西下，积雪泛红。很难理解这只不过是一个充满敌意的宇宙中的一小部分，更无法想象到现在的宇宙是从一个难以言传的陌生的早期状态演化而来，而又面临着无限冰冷的，或者是炽热难耐的末日。宇宙愈可理解，也就愈索然无味。

——温伯格，《最初三分钟》

12.1　宇宙学和宇宙学原理

宇宙学是研究宇宙整体的性质、结构、运动和演化的科学。宇宙是物质世界的整体，宇宙学集中研究宇宙的主要特征和普遍性质，把宇宙这个复杂的对象，化为比较简单的模型，加以比较、分析和研究。

“宇宙万物从何而来?”、“宇宙有末日吗?”、“宇宙是有限的还是无限的?”、“宇宙之外还有别的宇宙吗?”、“如果宇宙有开端，那么在这开端之前发生了什么?”……在人类认识自然的历史长河中，人们不断发问，难有圆满解答。差不多每个古老的民族都有大胆的揣测和离奇的神话，试图回答这些深奥的问题，但大多出自主观臆想，经不起推敲，甚至不能自圆其说。

在中国古代，关于宇宙的结构主要有三种学说：盖天说、浑天说和宣夜说。盖天说主张“天圆如张盖，地方如棋局”。浑天说认为天是蛋壳，地是蛋黄，天地是双层球形结构。宣夜说认为根本不存在有形质的天，日月星辰自然地飘浮在太空之中。天色苍苍是因为它“高远无极”。

在古代希腊和罗马，关于宇宙的构造和本源也有过许多学说。如泰勒斯（Thales）的水是宇宙万物本源说；毕达哥拉斯（Pythagoras）的宇宙最外层是永不熄灭的天火说；菲洛劳斯（Philolaus）的宇宙中心火焰说；亚里士多德的多

层水晶球说；托勒密（Ptolemaeus）的地球中心说等。进入中世纪后，宇宙学被纳入经院哲学体系，教会尊崇托勒密的地球中心说，使之占据正统地位，并与宗教、政治紧密地结合在一起，桎梏科学发展，延续到文艺复兴时代，哥白尼的太阳中心说才推翻了地球居宇宙中心的错误观念。布鲁诺更进一步认为太阳也不是宇宙的中心，宇宙是无限的，不存在任何中心。牛顿最早用古典力学方法和欧几里得（Euclid）几何观念建立了绝对的无限的时空宇宙体系。康德和拉普拉斯论证了太阳系行星起源的问题，率先从科学的角度动摇了“自然界在时间上没有任何历史”的观念（恩格斯，自然辩证法）。

进入 20 世纪以来，天文学家的视野扩展到河外星系、星系团乃至总星系。对宇宙的年龄、宇宙的物质分布、宇宙的化学元素丰度、宇宙的物质平均密度、宇宙膨胀的速度、宇宙背景辐射等大尺度宇宙空间的情况有了进一步的了解，开始建立起以观测数据为基础、以现代物理学为背景知识的现代宇宙学。

现代宇宙学包括密切联系的两个方面：观测宇宙学和理论宇宙学。前者侧重于通过实际观测发现大尺度的宇宙特征；后者侧重于从理论上研究宇宙的运动、结构和演化机制，进而建立宇宙模型。宇宙模型主要包括三方面的问题：大尺度上天体系统的运动形态、结构特征和演化方式。

关于大尺度上天体系统的结构，有两类不同的模型：一类是等级模型，认为天体的分布是逐级成团的，在任何尺度上，物质分布都具有非均匀性；另一类是均匀模型，认为天体逐级成团的特性到某一尺度上不复存在，在大尺度上，天体的分布基本上是均匀的，各向同性的。根据现代关于星系计数、射电源计数和微波背景辐射等实测结果，在大于 1 亿光年的尺度上，均匀模型比较符合实际情况。所以，关于宇宙在大尺度上的均匀、各向同性的观点普遍为现代宇宙学者所承认。他们建立了一个讨论问题的前提，叫做宇宙学原理。其基本含义是：①在宇宙尺度上，空间任一点和任一点的任一方向，在物理上是不可分辨的，即在密度、能量、压强、曲率、红移量等方面都是完全相同的。但同一点，在不同时刻，其各种物理量都可以不同，即容许存在宇宙演化。②从宇宙中任何一点进行观测，观察到的物理量和物理规律是完全相同的，没有任何一处是特殊的。地球上观察到的宇宙演化图景，在其他天体上也能观察到。宇宙处处都是中心，又处处都不是中心。宇宙学原理只是为讨论问题方便而作的一种约定，并不是已经被事实证明的定理。大多数宇宙模型都遵从宇宙学原理，也有少数宇宙模型不承认宇宙学原理，如等级式宇宙模型。

12.2 牛顿静态宇宙模型

牛顿是最早用科学方法研究宇宙学问题的科学家之一。牛顿静态宇宙模型并

不单指牛顿本人的宇宙学论述，而是泛指在牛顿经典力学体系架构下，对宇宙整体特性形成的观念。牛顿静态宇宙模型对时间和空间有两个基本的认识：①时间和空间是绝对的，相互独立的。②时间和空间都是无限的。牛顿在《自然哲学的数学原理》一书中写道："绝对空间，就其本性来说，与任何外在的情况无关，始终保持着相似和不变。"牛顿的绝对空间是一个与物质无关的存放物质的容器，它在上下、左右、前后各个方向都是无限延伸的，在这个无限空间里到处都有天体分布。即使所有物质都没有了，空间依然存在。在同一著作中，牛顿还写道："绝对的、真实的、数学的时间，由于它自身的本性，与任何外界事物无关地、均匀地流逝。"他认为时间是所有事物共同依存而又不受任何事物牵连的绝对存在，它无始无终。即使所有物质发展的过程都结束了，时间依然不断地流逝。绝对空间是静止不动的，绝对时间是永远流逝的；空间和时间都永无止境，不存在起源的问题。这就是牛顿静态宇宙模型的精髓。

牛顿静态宇宙模型很自然地被人们普遍接受，因为它不需要回答"宇宙如果有界限，那么界限以外是什么？时间如果有起点，那么起点以前是怎样的？"这些无法回答的问题。

1846 年海王星的发现使牛顿力学体系更加牢固地建立。1873 年麦克斯韦（J. C. Maxwell）建立了电磁现象基本规律的数学表达式，造就了电动力学的完整工程。牛顿力学和电动力学的巨大成就使当时的物理学界认为物质世界的运动规律已经完全被掌握了。只要给出初始条件，就可以预知未来的一切物理过程。

1900 年，英国的物理学权威开尔文（Kelvin，即 W. Thomson）在一次题为"遮盖在热和光的动力理论上的 19 世纪乌云"的演说中说："在已经基本建成的科学大厦中，后辈物理学家只要做一些零碎的修补工作就行了……但是，在物理学晴朗天空的远处，还有两朵小小的令人不安的乌云。"他指的这两朵乌云是普朗克关于黑体热辐射的实验和迈克耳孙（A. A. Michelson）-莫雷(E. W. Morley)的光干涉实验。20 世纪的头 30 年，这两朵小小的乌云果然化作了物理学天空中的电闪雷鸣，狂飙起处，整座经典物理学的大厦也都为之动摇了。这 30 年中，人们揭开了原子内部的秘密，窥测到遥远的河外星系的行踪。普朗克实验导致薛定谔、海森伯、狄拉克创建量子力学；迈克耳孙-莫雷实验的结果从爱因斯坦的相对论找到归依。美轮美奂的经典物理学体系只是在某种程度上近似地描绘出了自然界的规律，更精确、更全面的理论要让位于以量子力学和广义相对论为两大支柱的全新架构。

迈克耳孙企图通过他们精巧设计的实验，寻找地球相对于绝对空间的运动，而大自然无情地给出了一次又一次否定的结果。当风烛残年的迈克耳孙仍抱着他的经典物理学信念为他们一次又一次的实验失败而懊丧不已的时候，爱因斯坦创立的相对论恰好说明，他们的实验是完全成功的，绝对空间并不存在。他们的实

验其实正是这一革命性理论的有力证明，不失为物理学历史上具有划时代意义的最优秀的实验之一，尽管获得过 1907 年诺贝尔物理学奖的迈克耳孙至死也没有理解和接受这一点。

认真追究起来，牛顿静态宇宙模型早就暴露出一些不能自洽的蛛丝马迹。比如说，当用万有引力定律讨论宇宙局部区域受力的情况时，总是假定在足够远处的天体产生的引力为零，但在无限宇宙中，在任何足够远处周围都有无限多个天体，它们的引力的合力不可能为零，这就是牛顿模型不能自洽的破绽之一。康德提出过一种调和的主张：宇宙既不能是有限的，也不能是无限的，故有限无限的问题本身没有意义，根本不应再讨论它。中国明朝时的杨慎（杨升庵，1488～1559）早在康德之前就已说过："天有极乎？极之外何物也？天无极乎？凡有形必有极。"他认为无限有限两种说法都有理由，从而也就都没有理由。

1826 年，德国的一位医生兼业余天文学家、最早的小行星发现者之一奥伯斯（H. W. M. Olbers）提出一种被称为"奥伯斯佯谬"的论点，使牛顿静态宇宙模型陷入困境。他提出，如果无限宇宙中均匀分布着无限多个恒星（当时还没有关于银河系和星系的概念），设每一个恒星的光度都是 E，恒星的空间分布密度为 N，考虑宇宙空间中某点 O，以 O 为球心，以 r 为半径的一个薄薄的球壳，厚度为 $\mathrm{d}r$（图 12.2.1），这层球壳的体积为 $4\pi r^2 \cdot \mathrm{d}r$，其中分布的恒星总数为 $4\pi N r^2 \cdot \mathrm{d}r$，每一颗星对 O 点产生的照度为 E/r^2，整个球壳对 O 点产生的照度为 $4\pi NE \cdot \mathrm{d}r$，这个量与 r 无关。整个无限宇宙中有无限多重球壳，对 O 点产生的总照度为

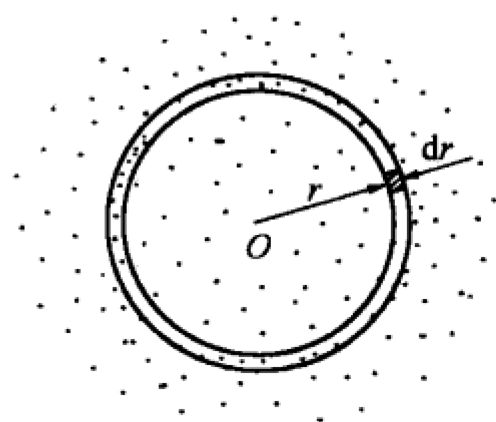


图 12.2.1 奥伯斯佯谬示意图

$$\int_0^\infty 4\pi NE\,\mathrm{d}r = 4\pi NE\int_0^\infty \mathrm{d}r = \infty$$

式中，O 是宇宙中的任一点，于是得出结论：宇宙中任意一点的光强都是无限大，即在任何位置看，"天空总是无限明亮的"。即使不用积分，只用逻辑推理，也能得到同样的结论：球壳的半径越大，恒星产生的照度越小，但球壳的体积越大，球壳内星数越多。球壳中全部恒星对 O 点产生的照度与 r 无关，是一个定数。围绕 O 点的远远近近无限多层球壳，每一层都产生同样一份照度，总加起来的照度当然是无限大了。如果认为远处的星被近处的星遮挡住，所以不能无限叠加，因而不是无限光亮的，但至少也是足够光亮的，而且各个方向亮度都相同，不存在暗黑的区域。这显然不符合人们看到的天空真实情况，所以说它是"佯谬"。毛病出在哪里呢？推导的过程明确无误，而结论显然站不住脚，只能说前提出了毛病。前提即牛顿静态宇宙模型。在相关讨论中，它涉及四个命题：

（1）宇宙是无限的。

（2）宇宙中到处都有大致上均匀分布的恒星，恒星的总数是无限的。

（3）宇宙是静止的，没有变化的。

（4）宇宙存在的时间是无限长的。

至少要推翻其中的一个命题，才能摆脱奥伯斯佯谬。其中前两个命题明显易见，而后两个命题常常被人们忽略。需提示一下：对于第三个命题，如果宇宙不是静止而是无限膨胀的，那么足够远处的星光就会因为退行速度太大而极度红移乃至消失，星空就不至于无限光亮了。对于第四个命题，如果宇宙存在的时间不是无限长的，在有限的时间里，光运行的路程也是有限的，比这有限路程更远的恒星，它们的光还没有来得及传播到这里，因而对这里的照度不产生影响，这就不能形成无限叠加的效果，奥伯斯佯谬就不一定能成立。

奥伯斯并非权威人士，奥伯斯佯谬传播范围不广，不足以动摇牛顿体系的权威性，直到爱因斯坦提出新的宇宙模型，牛顿静态宇宙观才受到强烈的冲击。

12.3　爱因斯坦有限无界宇宙模型

爱因斯坦 1915 年 11 月发表了广义相对论。广义相对论是在牛顿引力理论和狭义相对论的基础上发展起来的。它是研究空间、时间、物质和引力的理论。广义相对论进一步揭示了四维时空同物质的统一关系，指出空间和时间不能离开物质而单独存在。空间结构的性质取决于物质的分布。爱因斯坦本人说过："空间、时间未必能被看成是一种可以离开物理实在的实际客体而独立存在的东西。物理客体不是在空间之中，而是这些客体有着空间的广延。因此'空虚空间'这概念就失去了意义。"空间处处都有物质，由物质产生的引力导致空间不是平坦的欧几里得空间，而是弯曲的黎曼空间。

欧几里得是古希腊数学家，所著《几何原本》13 卷，是世界上最早的公理化数学著作。欧几里得的几何学（欧氏几何）是一座非常宏伟的严密的逻辑体系大厦，但它的完美结构建立在五条公理和五条公设的基础上。所谓公理就是当作自明的真理；所谓公设就是虽非自明但被视为正确的假设。它们都是没有证明的。其中第五条公设（平行公设）为：通过给定直线外的任意一点，有而且仅有一条直线与此直线平行。2000 多年来，曾有许多人试图证明这条公设是欧氏几何其他公设、公理与定义的推论，但都没有成功，直到 19 世纪才被严格证明它是独立的，而不是其他公设、公理与定义的推论。如果改写这条公设，也同样可以建立起宏伟严密的几何学大厦，这就是非欧几何学。黎曼几何是非欧几何中的一种。服从欧氏几何的空间称为欧几里得空间，服从黎曼几何的空间称为黎曼空间。黎曼（G. F. B. Riemann）是 19 世纪德国数学家，他和庞加莱被称为现代数

学的两位奠基人。他改写了上述第五条公设，改为："过一点不可能做出与另一直线平行的直线。"从而创立了黎曼几何。欧氏空间是平直的无限伸展的空间；而黎曼空间是弯曲的，它有一定的曲率。无论这个曲率有多小，空间只能是有限的。

广义相对论认为时间和空间密不可分，时空的弯曲是引力场造成的，而引力场来源于物质的万有引力作用。只要有物质，就存在引力场，引力场的大小决定了时空弯曲的程度。时间和空间的结构和性质是依赖于物质的，不能独立于物质而绝对地存在。如果物质没有了，时间和空间也就跟着没有了。广义相对论的弯曲时空不服从欧氏几何学，而服从黎曼几何学。数学是抽象的，而物理学需要经过实验证据的考验。相对论在各个领域里的成功，意味着黎曼几何在更广大（宇宙空间）和更细小（基本粒子领域）的范围内可能比欧氏几何更接近于物理世界的真实情况。

1917 年，爱因斯坦以引力场方程为依据，提出一个有限无界的静止的宇宙模型，文章的题目是"根据广义相对论对宇宙学所作的考查"。在这个宇宙模型里，现实的三维空间是一个无界空间，无论向哪个方向运动都永远走不到尽头，不可能遇到边界；宇宙中所有各处都具有同等地位，处处都是中心，又处处都不是中心，或者说宇宙没有中心。但是，由于宇宙中到处充满着物质，存在引力场，根据相对论，宇宙的三维空间是弯曲的。一个有曲率的三维空间只能是有限空间，因而宇宙是有限的。一个有限的宇宙当然不满足奥伯斯佯谬中的第一个命题，因而摆脱了奥伯斯佯谬的困境。

为了帮助人们理解这个有限无界宇宙，爱因斯坦本人曾经举了一个生动的例子：在一个球的表面上有一只充分压扁的臭虫（图 12.3.1），它是二维的，身体没有任何厚度。这只臭虫可能有足够的理智，会写书，能研究二维世界里的物理学，但它所处的宇宙是一个二维空间的宇宙。凭它的直觉和想象，不可能理解第三维。它在整个球面上，可以向前向后向左向右爬行，永远都不会有边界，也找不到哪里是宇宙的中心。但是它所处的宇宙显然是一个弯曲的二维宇宙，从三维上看，它当然是有限的，被限制在三维空间里一个稳定的球面上。爱因斯坦写到："人就同这只不幸的臭虫完全一样，处在这样的情况中，只有一点区别，那就是人是三维的。在数学上，人能想象第四维。对于他来说，第四维只是在数学上存在着。他的理智不能理解第四维。"

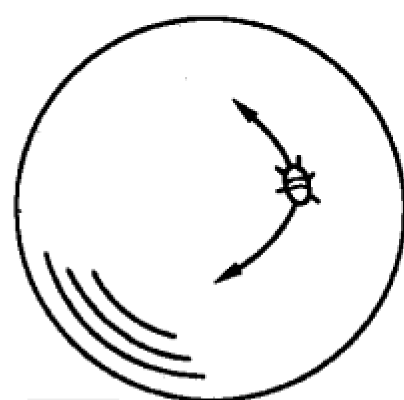


图 12.3.1 二维的有限无界宇宙模型

爱因斯坦将宇宙学原理与广义相对论结合起来，提出了有限无界宇宙模型。当然，宇宙究竟有限还是无限，至今尚无定论。爱因斯坦的贡献不在于论述宇宙

有限还是无限，而在于为宇宙学的研究奠定了现代科学方法的基础。

爱因斯坦的宇宙模型有一个严重的缺点，那就是它的不稳定性。这个宇宙模型是静态的，它的几何性质不随时间而改变。假如某一时刻宇宙受到一个微小的扰动，比如某种原因使宇宙略为变小了一点，宇宙中所有物体之间的距离都将略为缩短，从而引力增强，又促使进一步收缩，并将一直收缩下去；反过来说，静态宇宙一旦有一个非常微小的膨胀，必将一直膨胀下去，因而这个宇宙是不稳定的。爱因斯坦为了得到一个稳定的静态宇宙模型，在引力场方程中加进了一个常数项叫做宇宙项，表现为一种斥力，以抗衡引力，起到了“负”物质的作用（详见 12.8）。

1922 年，苏联数学家弗里德曼（A. A. Фридман）发表了著名的论文《论空间的曲率》，求出了不含有宇宙项的引力方程的通解，得到一个膨胀的有限无界宇宙模型。1925 年 7 月，37 岁的弗里德曼接受列宁格勒地球物理研究所的一项研究任务，乘热气球升空，创造了 7 400 米的高度记录，不幸于不到一个月后罹患伤寒，9 月 16 日离开人世。23 年之后，他的学生伽莫夫提出了举世闻名的“大爆炸”宇宙模型。1927 年，爱丁顿的学生，比利时天文学家勒梅特（G. Lemaitre）发表论文《考虑河外星系视向速度的常质量增半径均匀宇宙》，也通过求解引力场方程获得一个膨胀宇宙的模型。1929 年哈勃关系发表，宇宙膨胀终于为天文观测所证实。爱因斯坦得知这一消息，1931 年 1 月 29 日亲自到哈勃所在的威尔逊山天文台了解情况，立即表示支持天文学家的发现（光盘图 12.3.2　爱因斯坦访问威尔逊山天文台），并高度推崇他原先不以为然的弗里德曼的论文。爱因斯坦在“以广义相对论为根据的空间结构”一文中说：“哈勃通过对河外星系的专门研究，指出它们所发射的光谱线显示出一种红移，这红移随着星系的距离而有规律地增长。对于我们现有的知识来说，这只能依照多普勒原理解释为整个宇宙的一种膨胀运动——根据弗里德曼，这正是引力场方程所要求的。”他还在《关于宇宙学问题的评注》一文中说：“有人试图不用多普勒效应来解释哈勃的光谱线红移。可是在已知的物理学中，并没有支持这种想法的事实。”“人们不得不认为哈勃发现的就是宇宙的膨胀。”根据弗里德曼和勒梅特的理论和实际的天文观测，爱因斯坦坦言自己提出的静态宇宙模型存在一个缺点，那就是宇宙项的提出。他在同文中说：“倘若哈勃的膨胀是在广义相对论的创立时期发现的，宇宙项就决不会引进来。现在看来，场方程里引进这样一个项更是缺少根据。”他后悔在引力场方程中引进宇宙项，说这是他“一生中最大的错事”。爱因斯坦大概没有料到，50 年后的今天，天文学家们又把宇宙项请出来，赋予它新的含义，重新论述它很可能真实存在的理由及相关的观测证据（见 12.8 节）。科学发现的历史在迂回曲折中前进着。爱因斯坦的宇宙模型虽然有它的局限性，但在现代宇宙学中仍不失为开拓性的工作。

12.4 伽莫夫的大爆炸宇宙模型

在膨胀宇宙的观念下，1932 年，勒梅特提出宇宙是由一个极端高热、极端压缩状态的"原始原子"突发膨胀而产生的。但他未能阐明原始原子与各种不同化学元素之间的关系，也不能阐明原始原子分裂、膨胀的具体过程。但这一思想却启示了另一位年轻的核物理学家兼天体物理学家伽莫夫。他是俄国人，弗里德曼的学生，出生于 1904 年，曾留学于哥本哈根和剑桥的卡文迪许实验室，20 世纪 30 年代经法国和比利时来到美国。1938 年，他在华盛顿组织了一次物理讨论会，在核物理和天体物理两个领域之间进行了广泛的交流。与会者之一，30 年代从德国来到美国的贝特，原来从事理论物理学研究，在这次会议的启发下，转而研究恒星的能源机制问题，当年就提出了恒星能源来自内部热核反应的理论（详见 9.1.4），1967 年被授予诺贝尔物理学奖。但是，恒星内部的氢-氦反应不能解释在整个宇宙中，在许多不同类型的天体，特别是在恒星和星系当中，为什么氢和氦的质量共占了全部质量的 98%以上，其中氦的比例占 25%～30%？靠恒星内部的氢-氦反应不可能达到如此高的氦丰度，更不能解释恒星和星系里大量的氢从何而来。一些年轻的恒星，刚刚开始聚变反应，它的氦丰度就已经占了 25%～30%。这又是为什么？根据核物理理论的计算，一颗恒星由氢聚变为氦而达到 25%～30%的氦丰度所释放出的能量比恒星实际所发射的能量要多得多。

1948 年，伽莫夫与他的学生阿尔弗和赫尔曼（R. Herman）发表了《宇宙的演化》与阿尔弗和贝特发表了《化学元素的起源》等文章，将弗里德曼和勒梅特膨胀宇宙的观念移植到核物理知识肥沃的土壤中，提出了一种比较完整的宇宙创生新理论。该理论认为，宇宙是由高温高压状态下的原始基本粒子，因空间的突发膨胀而开始创生的。这些基本粒子开始时几乎全部都是中子，由空间膨胀导致的温度下降，使中子按照当时已熟知的放射性衰变过程自由地转化为质子、电子等，逐渐产生由轻到重的各种化学元素。随着整个宇宙的膨胀和降温，各种粒子进一步形成星系、恒星等天体，然后沿着天体演化的阶梯一直延续到现在。现今宇宙中大量存在的氢和约占 1/3 的氦主要是早期宇宙的产物。伽莫夫幽默地称呼他们提出的理论为 α-β-γ 宇宙创生理论。这 3 个排在最前面的希腊字母，既是阿尔弗、贝特、伽莫夫的姓氏，也隐喻着宇宙万物创生伊始的含义。伽莫夫、阿尔弗和赫尔曼还预言：宇宙早期从不透明状态膨胀到光子与其他粒子脱离热平衡而开始自由辐射传播的时候，演变到今天，应当遗留下温度为 5～10 开的宇宙背景辐射。不幸的是，α-β-γ 宇宙创生理论并没有被当时的大多数理论物理学家和天文学家所接受，当时的实测条件也不可能去搜寻背景辐射是否存在。据著名的美国核物理学家温伯格回忆，阿尔弗和赫尔曼曾经告诉他，他们向霍普金斯大学、

海军研究所和国家标准局的雷达专家询问过观察宇宙背景辐射的可能性，不过得到的答复是 5～10 开的背景辐射太弱了，当时的技术条件无法测量。还有一个原因是根据哈勃的宇宙膨胀算出的宇宙年龄太小，出现了"母亲比孩子更年轻"这样的笑谈。一些持反对意见的人给伽莫夫的理论模型冠以一个含有嘲讽意味的名字"大爆炸"（big-bang model），还有人刊出漫画：几个疯子在一口炒菜大锅里"big-bang"一声"爆出"一个宇宙来。伽莫夫等却欣然接受了这一名称，"大爆炸宇宙模型"从此有了特定的含义。以后，又有新的宇宙模型被提出来，大爆炸模型遭受冷落。20 年后，彭齐亚斯和威尔逊测到了宇宙背景辐射，核物理理论也深入发展，使大爆炸宇宙模型重新大放异彩，成为举世公认的"标准宇宙模型"被载入科学发展的史册，使其他各种宇宙模型黯然失色而退出历史舞台。

1967 年 6 月 23 日，时任科罗拉多大学教授的伽莫夫，得知宇宙背景辐射已经被测出的消息后，给普林斯顿大学的皮布尔斯写信，说他们当初进行宇宙学研究时，射电天文学还处于幼年时期，没有办法能够直接探测到宇宙背景辐射。1968 年 8 月 19 日，伽莫夫辞世，长眠于远离祖国的绿色小山墓地（光盘图 12.4.1　位于 Green Mountain Cemetery 的伽莫夫墓）。

顺便提及，1993 年 8 月出版的美国《天空与望远镜》杂志征求为大爆炸宇宙模型换一个更好的名称，应征信函多达 1 万多封，却没有征得满意的结果，人们仍然称之为"大爆炸宇宙模型"。

12.5　稳恒态宇宙模型

稳恒态宇宙模型是在大爆炸宇宙模型不被接受的背景下，由英国天文学家邦迪（H. Bonti）、霍伊尔和戈尔德于 1948 年共同提出来的。当时膨胀宇宙模型虽然得到哈勃关系的实测支持，但有一个令人困惑的问题使膨胀宇宙模型蒙在阴影之中，那就是根据当时所测到的哈勃常数推算出来的宇宙年龄太小。当时由于不了解星际消光的作用，造父变星周光关系零点定得不准，造成哈勃关系 $V=HD$ 中的哈勃常数 H 值太大（约为 530 千米/秒/百万秒差距），如此得到的宇宙年龄还不到 20 亿年，而已测得的地球年龄和恒星年龄都超过 40 亿年。宇宙中的天体竟然比宇宙本身年龄更老，这显然是荒谬的。连爱因斯坦也因这个问题而陷入矛盾之中。他在 1945 年出版的《相对论的意义》第二版附录中说："看来我们必须认真接受膨胀宇宙这个观念，尽管这个膨胀的宇宙'年龄'不长。"在同一篇文章里他又说："最后，但不是最不重要的：宇宙的年龄，按照这里所用的意义来说，无疑地必定大过由放射性矿物所推断出的坚固地壳的年龄。既然由这些矿物所测定的年龄在任何方面都是可靠的，那么，如果发觉这里所提出的宇宙学的理论同任何这样的结果有矛盾，它就要被推翻。在这种情况下，我看不出有合理的

解决办法。”除了宇宙年龄障碍之外，膨胀宇宙模型还面临着奇点困难：宇宙膨胀伊始，所有物质都聚在一个点上。这是难以令人接受的。

稳恒态宇宙模型试图绕开这些障碍和困难，甚至把宇宙学原理也修改成为所谓“完整的宇宙学原理”：宇宙物质的空间分布在大尺度上是均匀的，各向同性的，同时也是永恒稳定的，没有演化问题，也不存在宇宙起源和归宿的困惑。这一理论虽然也承认宇宙膨胀，但认为在宇宙膨胀的过程中，物质密度保持不变，因此必须连续不断地有新的物质产生出来，其产率刚好填补了因宇宙膨胀而出现的密度减小趋势。按当时的计算，整个宇宙在 5 000 亿年中，每立方米产出一份相当于一个氢原子的质量。这个数量微小到不可能用观测事实来检验。稳恒态宇宙模型调和了牛顿静态宇宙模型和膨胀宇宙之间的矛盾，但它又面临着与质量守恒、能量守恒等一系列基本物理定律相违背的问题。后来的许多观测事实也都不支持这一模型。时至今日，稳恒态宇宙模型已成明日黄花，不为人们所接受了。但从历史角度看，稳恒态模型也有可取之处，因为它的理论表述确切而不含糊，它的一些计算方法和与哲学观念有关的提法，在促进人们提高认识方面也起到过推动作用。

还有一种宇宙模型称为等级式宇宙模型，最早（1907 年）是由瑞典天文学家沙利叶（C. W. L. Charlier）提出来的，近代又为法国天文学家沃库勒所倡导。这一宇宙模型认为，宇宙中天体的分层分布是没有止境的，如恒星、星系、星系团、超星系团……直至无限。在每一个等级内物质的平均密度随着等级的升高而下降，甚至趋于零。在这一模型中，宇宙虽然是无限的，但由于物质分布不均匀，只要恒星的数密度随距离的增加下降得足够快，就可以避免奥伯斯佯谬。等级式宇宙模型不遵从宇宙学原理。沃库勒认为“宇宙学原理是由于美学上的偏见和数学上的简化而提出来的。”在他的模型中，宇宙既然没有统一的平均密度，也将不会有统一的膨胀率，不会有统一的哈勃常数。因此这一模型抛弃了其他许多宇宙模型的简单性，留下了许多复杂化的问题，而自身又给不出确切的数学描述和定量预言，目前尚难取得明显进展，而沦至乏人问津的境地。

12.6 标准的大爆炸宇宙模型

在伽莫夫大爆炸宇宙模型遭受冷落的年代里，稳恒态宇宙模型成为最流行的理论，它断然否定宇宙存在起源问题。曾几何时，随着近代基本粒子物理学的进展和天文观测证据的获得，宇宙年龄太短的问题也因为哈勃常数值的重新测定而不再令人困惑，大爆炸宇宙模型又以崭新的面貌重现世界，获得“标准宇宙模型”的桂冠，为大多数宇宙学家普遍接受，也逐渐为广大公众所了解。现在在各种场合提到大爆炸宇宙模型或标准宇宙模型都是指这一源于 20 世纪 30 年代而于

七八十年代被重新审视与充实提高的宇宙模型。这一模型之所以如此成功，是因为它建筑在近代粒子物理学坚实的基础上，理论预言与实际天文观测相一致，并且是最简单而又最自然的宇宙模型。正如著名粒子物理学兼宇宙学家，1979 年诺贝尔奖获得者温伯格所说："标准模型之所以成立，是因为近代天体物理学基本上是客观的，人们对它达到了一致的看法，既非由于哲学偏爱的变迁，也非由于天体物理学巨匠们的影响，而是由于来自经验和数据的压力。"英国物理学家彭罗斯也说："从宇宙创生后万分之一秒，直到后来的 3 分钟，宇宙的行为已被非常仔细地算出……现代物理理论对于这种计算是完全足够的"。

12.6.1　化学元素的演化史

化学元素在过去很长时期里被看做是物质的基元，是永恒不变的，没有什么演化问题。1896 年和 1898 年，贝克勒尔（A. H. Bequerel）和居里夫妇（P. Curie，M. Curie）相继发现了天然放射性，人们看到一种化学元素经放射性衰变后变成了另一种化学元素。但是，直到 1907 年，尽管存在放射性衰变的证据已经很多了，当时的物理学权威开尔文，仍然不承认化学元素会有演化的过程。1907 年 12 月开尔文去世，1908 年 1 月卢瑟福就发表论文，论述了化学元素衰变的过程和规律，指出化学元素也可能存在相互演变的历史。

1957 年，伯比奇夫妇（G. Burbidge，M. Burbidge）、福勒（W. Fowler）和霍伊尔在《现代物理评论》上发表了元素在恒星中合成的理论，通常被称为 B^2FH 理论。他们摒弃了全部元素都是通过单一过程一次形成的看法，认为所有元素及其同位素都是由氢通过发生在恒星内部的核反应过程逐步形成的，通过超新星爆发或恒星风的形式抛射到宇宙空间。各种恒星都不外是把较轻的元素变成较重的元素的"炼炉"，化学元素周期表上的所有天然元素都是在这里炼制出来的。到铁为止的元素炼制于恒星的主序阶段；铁以后的元素炼制于超新星爆发的过程中。中外历史上有数不清的炼金术士们，穷毕生精力为寻找转变元素的"炼炉"而失败了。他们绝没有想到，每当他们因失败而仰天长叹时，他们看到的每一颗恒星正是他们梦寐以求的炼炉！

1983 年，福勒获得了诺贝尔物理学奖，标志着化学元素有限起源的 B^2FH 理论终于赢得了举世的公认。但以 B^2FH 为先导的恒星内部核合成理论，有一个不能解释的问题：两种最轻的元素氢和氦如何形成以及它们所占的宇宙丰度比例。在地球上氦很少，因为氦原子既轻又在化学上是惰性元素，不与其他化学元素化合在一起，所以在行星演化过程中大都逃逸掉了。但在宇宙范围中，氦丰度仅次于氢，占第 2 位，其值在 25%～30%，而且氦的分布在宇宙大尺度上是相当均匀的。这些结论都是通过对恒星和星际物质的光谱观测得到的。宇宙中广泛存在的氢和氦的来源不能用恒星内部的核合成过程来解释，必须同整个宇宙的起

源联系在一起。氢原子核就是质子，氦原子核是两个质子和两个中子的结合体。它们的广泛形成要从物质粒子的产生机制说起。

12.6.2 物质粒子的产生机制

9.1节已经简要介绍过物质粒子的基本情况。基本粒子分三类：光子、轻子（包括电子和中微子）和夸克。由夸克组成的中子和质子属于强子类中的核子，各种化学元素的原子都是由中子、质子和属于轻子的电子组成的。光子是能量，其余粒子是物质。光子在一定温度下可因碰撞而生成其余粒子，也就是说，能量直接转换为物质。转换当量的计算公式是：$E=mc^2$，E 是能量，m 是物质的质量，c 是真空中的光速。不同粒子转换的温度要求不同，它们各自对应于一个恒定的温度值，称为阈温。达到或超过阈温时，相应粒子才能由光子碰撞产生出来；低于阈温时，转换不能进行，物质粒子也就不能产生。阈温的数值服从玻尔兹曼公式：$E=kT$，T 是阈温，k 是玻尔兹曼常量，E 是相应粒子的转换能量。E 又可以通过公式 $E=mc^2$ 与粒子的质量相联系。玻尔兹曼常量是统计力学的基本常数，$k=1.380\,65\times10^{-23}$焦耳/开，表征着每一物质粒子在每一绝对温度下具有的静能量，据此可以计算物质粒子的阈温 $T=E/k=mc^2/k$，m 是这种粒子的静质量。一些物质粒子的静质量、静能量和阈温列于表12.6.1中。

表12.6.1 一些物质粒子的静质量和阈温

粒子		反粒子	静质量/克	静能量/兆电子伏	阈温/亿开
光子			0	0	0
轻子	中微子	反中微子	0 (?)	0 (?)	0
	电子	正电子	9×10^{-28}	0.5	59
强子	质子	反质子	1.6×10^{-24}	938	10万
	中子	反中子	1.6×10^{-24}	939	10万

玻尔兹曼（L. Boltzmann）是奥地利物理学家，他和美国人吉伯斯（W. Gibbs）一起创立了近代统计力学。62岁时（1906年），因自己的物理理论受到某些哲学家的强烈批评而深感失望，自缢身亡，成为自身学术思想的殉道者。

根据量子力学理论的对称性原则，由光子碰撞产生的粒子都是成对的，既有正粒子，也有反粒子。正粒子和反粒子再相遇的时候，又会湮灭成光子。现代粒子理论认为强子是由更基本的物质粒子夸克和反夸克组成。在极短距离和极高温度下，正、反强子要破碎为夸克，夸克之间没有相互作用，处于"渐进自由"状态；温度稍低，正、反夸克又结合成正反强子。夸克理论已在许多不同的应用中取得成功。质子和中子的行为表明它们由3个夸克组成；ρ 介子的行为正如它是

1 个夸克和 1 个反夸克组成的一样。这些行为已在基本粒子实验中被观察到了。1995 年美国人宣布找到了顶夸克存在的证据（详见 9.1.3 小节）。

在温度高于强子阈温（10 万亿开）时，当然也高于轻子阈温（59 亿开），光子碰撞产生正、反强子和正、反轻子，同时也进行着相反的过程：正、反强子和正、反轻子相遇而湮灭为光子。未经湮灭的强子破碎为夸克。在粒子数量足够多，并达到反应平衡状态时，粒子的总数应当大致与光子的数量一样多。否则，如果粒子比光子少，则它们的产生将快于它们的湮灭，于是它们的数量便会增多；而如果粒子比光子多，则它们的湮灭将快于它们的产生，于是它们的数量便将减少。

在温度低于强子阈温（10 万亿开），但高于轻子阈温（59 亿开）时，强子不能再由光子碰撞产生，也不再破碎为夸克。质子与中子以各占一半的数量单独存在着，但正、反质子或正、反中子的湮灭事件不断发生，强子数逐渐减少。轻子（包括电子和中微子）与光子的数量保持平衡。

自由中子是不稳定的，它会经 β 衰变而变成质子加电子加反中微子，反应式为

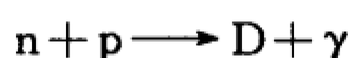


$$n \longrightarrow p + e^- + \overline{\nu_e}$$

半衰期只有 10 分钟左右，平均寿命 888.6 秒。

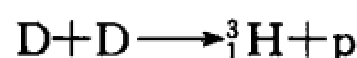
如果温度低于轻子阈温，则光子碰撞产生轻子的过程也结束了。

当温度低于 9 亿开时，中子和质子之间建立一种反应



$$n + p \longrightarrow D + \gamma$$

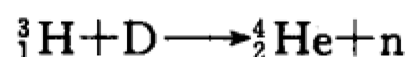
式中，D 是反应生成的氘原子核，γ 是具有 2.2 兆电子伏特能量的、位于 γ 射线波段的光子。氘是氢的同位数，氘核由一个质子和一个中子组成。在温度更高的时候，生成氘核的反应也在进行，但迅即又通过逆过程——氘核吸收 2.2 兆电子伏特能量的光子重新分裂成中子和质子，只有温度低于 9 亿开，超过 2.2 兆电子伏特能量的光子已经很少，逆过程难以进行，氘核才能大量的生成。氘核是不稳定的，但是有一种机会，使两个氘核相撞而进一步生成氦原子核，反应过程如下：



$$D + D \longrightarrow {}^3_1H + p$$



$$D + D \longrightarrow {}^3_2He + n$$



$${}^3_1H + D \longrightarrow {}^4_2He + n$$



$${}^3_2He + D \longrightarrow {}^4_2He + p$$

氦原子核 ${}^4_2He$ 由 2 个质子和 2 个中子组成，在核力的束缚下成为十分牢固的体系。氦核里的中子结束了自由状态，再不能衰变而被稳定地保存下来了。这是一个非常重要的步骤。如果没有这一步骤，中子统统衰变，宇宙中就只有氢而不会有其他任何品种的化学元素了。

12.6.3 大爆炸的宇宙进程

大爆炸宇宙模型理论认为，今天的宇宙是从高温、高密状态经膨胀、降温演化而来。宇宙诞生的时候，物质密度趋于无限大，能量集中为引力能，后来形成的物质间的4种相互作用当时统一在一起，空间是极度弯曲的。随着膨胀降温，产生出各种各样的粒子，引力能逐渐转化为粒子能，再进一步膨胀降温，直至演化为今日的宇宙。值得注意的是，不能理解为一团物质在业已存在的空间某处爆炸碎裂散开而形成宇宙。应当理解为空间是与物质联系在一起的。“爆炸”的含义实际就是空间本身的迅速膨胀，因膨胀而降温是在全宇宙各处都在进行的持续过程。在膨胀开始以前，没有时间也没有空间。严格说，这个“以前”没有意义。时间起始于斯。所谓宇宙演化，是指时间起始以后，宇宙中的物质和能量的分布及状态随时间而变化的过程。

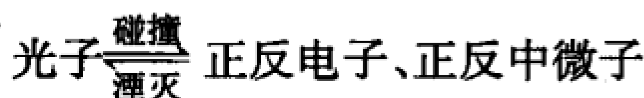
首先，我们要确定，该用什么量来描述时间？年或秒这些时间单位都是与地球运动的概念相联系的，而宇宙早期根本没有地球和太阳。有一个很适合于当时描述时间的量就是宇宙的绝对温度。因为宇宙早期的膨胀是绝热的（绝热是热力学中的一个名词，意为没有热量泄漏出去），宇宙随膨胀而尺度增大，密度减小，温度降低。尺度、密度和温度都可以用来衡量时间，但尺度和密度都不易测量，唯一好测量的是温度，而且温度与粒子的热运动能量之间有很方便的换算关系——波尔兹曼公式：$E=kT$。所以我们选择温伯格《最初三分钟》的叙述方式，以温度作为描述时间的量。当然，为了对照方便，也将温度时标换算为秒和年这些人们已经习惯了的时间单位。同时选择几个关键的温度时刻定格几个画面，观察一下宇宙的大爆炸进程。为了回避真正的时间起点（$t=0$，温度无限大，只有能量，没有物质）所存在的困难，我们从宇宙创生后10^{-4}秒，即温度>10万亿开（10^{13}开）开始讨论（见表12.7.3）。

第一个画面，时标10^{-4}秒，温度>10万亿开。这时的宇宙温度大于强子的阈温，



的反应处于平衡状态，光子数与粒子数一样多。强子破碎为夸克，夸克处于“渐进自由状态”。宇宙中的粒子品种有：正、反夸克，正、反电子，正、反中微子。产生出来的正反粒子数量之比为10亿+1∶10亿。它们相互湮灭之后只有10亿分之一的正粒子留存下来，由于强子的质量优势而被称为强子时代。

第二个画面，时标0.01秒，温度1 000亿开。这时的宇宙温度小于强子的阈温，但仍大于轻子的阈温。光子产生强子的反应已经停止，但



的反应仍在进行，并处于平衡状态。强子不再破碎为夸克，原先处于“渐进自由”状态的夸克，或者正、反湮灭，或者组合成强子，在一个中子或质子里找到了栖身之地。正、反强子湮灭后，质子和中子各占剩余强子的一半；轻子数激增，轻子和强子的数量比为 10 亿∶1，被称为轻子时代。

在正反中微子的参与下，中子和质子不断地进行着相互转化的过程。但由于中子的质量比质子略大一点，中子转化为质子比相反的转化要容易一些，至时标 0.2 秒时，质子与中子的数量比变为 62∶38。到时标 1.09 秒，温度 100 亿开时，质子与中子的数量比变为 76∶24。因为时间很短，中子衰变为质子的情形还没有显现出来。中微子和反中微子的平均自由时间延长，不再和电子、正电子、光子同处于热平衡之中，逐渐成为自由粒子。

第三个画面，时标 13.82 秒，温度 30 亿开。这时的宇宙温度小于轻子的阈温，轻子不能再由光子碰撞产生出来。轻子数锐减而不再成为宇宙的主要成分，轻子时代结束。大量正、反轻子湮灭所释放出的能量减慢了宇宙冷却的速度。中子和质子有机会结合在一起形成氘核。但在没有进一步形成氦核之前，氘核就马上破裂了。中子数量继续减少，衰变现象也逐渐显现，质子与中子的数量比为 83∶17。

第四个画面，时标 3 分 46 秒，温度 9 亿开。这时的宇宙温度远小于轻子的阈温，所有能量转化为物质的反应都已停止，物质已经全部产生出来。正、反粒子大部分湮灭，只留存 10 亿分之一的正物质。氘核能够迅速地与一个中子碰撞形成氚核，或者与一个质子碰撞形成 ^{3}He 核，再与一个质子或中子碰撞形成稳定的氦核；氘核与氘核之间，也可以进行 12.6.2 所说的反应生成氦核，被称为核合成时代。

中子因钻进了氦核而得以保存下来，不再衰变。由于这时的质子与中子的数量比为 87∶13，而全部中子都与等量的质子结合为氦核，剩余的质子单独成为氢核，所以氢核与氦核的质量比为 (87－13)∶(13＋13)＝74∶26，这两个比例数一直保持到现在。

第五个画面，时标 30 万至 70 万年，温度 4 000 至 3 000 开。在此画面之前，宇宙的尺度虽已膨胀到相当的规模，但各种物质粒子大体均匀地分布在空间各处，没有聚集，没有成团，没有形成复杂的结构，悬浮于高温的光子之中。电子和正电子已经几乎完全湮灭了，只留下少量的（10 亿分之一）的电子和质子的电荷相平衡。除氢原子核和氦原子核外，又形成了少量的一些较轻的化学元素锂、铍等的原子核，但不能形成稳定原子。电子与原子核和质子及光子等混合组成等离子体。光子不可能像现在宇宙中那样通行无阻地运动。光子在它的旅程中与稠密的物质粒子左冲右突，特别是碰到电子的时候会被电子散射或吸收，它们的“自由程”很短，“平均自由时间”也很短，能量和物质处于热平衡状态。

30 万岁以后至 70 万岁，空间扩大了，温度条件也允许了，开始出现稳定的氢、氦原子，进入复合时代。自由电子逐渐消失，物质与辐射脱离（退耦）宇宙逐渐从以能量为主的时期转变为以物质为主的时期。光子可以自由穿行，黎明的曙光来到了。这最早出现的原初辐射遗存到今天，就是 3 开宇宙背景辐射。

第六个画面，时标 4～5 亿年，温度 100 开。70 万岁以后，宇宙继续膨胀降温，辐射压力越来越小，引力上升为主要作用力，物质粒子开始聚集成团，第一批恒星诞生。此前的一段时期，虽有暗弱的背景辐射，物质仍大体呈均匀结构，只有微小的、局部的密度起伏，没有任何会发光的天体，天文学家称之为“黑暗年代”(dark ages)。

当“黑暗年代”结束，恒星和星系成批诞生。星光灿烂的宇宙辉煌时期开始了。宇宙的大尺度结构逐渐形成。在星光的作用下，宇宙中的氢、氦原子再次电离，变成等离子体；在恒星内部，较轻的原子核融合为较重的原子核。大恒星超爆又造就出更重元素的原子核。因恒星超爆而散落的原子核与太空和星云中的物质再度聚集，形成第二代、第三代恒星，一些恒星周围出现行星、卫星……。

第七个画面，时标 137 亿年，温度 2.7 开，一颗小小的行星——地球上出现了万物之灵的人类（当然，也许还有别的行星，别的智慧生命）。人类智能的发展，不仅探测到物质宇宙最早的“原初辐射”遗迹——3开宇宙背景辐射，而且试图了解宇宙创生的全过程。

1992 年，美国伯克利大学的斯穆特（G. Smoot）用计算机处理 COBE 卫星的大量数据，在 10^{-5}开精度下，给出一张令人激动的宇宙背景辐射的能量分布图（光盘图 12.6.1　COBE 给出的宇宙背景辐射能量分布图）。图中的不均匀结构表现出背景辐射中微小的温度起伏，说明在宇宙 30～70 万岁时，在物质分布高度均匀的背景上已经出现微小的不均匀性。正是这些微小的不均匀性成为导致以后星系和恒星形成的种子，使宇宙在总体密度降低的同时，有局部区域的物质在引力作用下集聚而形成高密度的多层次天体。2006 年，斯穆特和 COBE 卫星主持人马塞共同获得诺贝尔物理学奖（参见 8.3 节）。2001 年被送入太空的 WMAP 人造小行星，2003 年公布的结果，得到比 COBE 卫星更为清楚、精致的宇宙 37.7 万岁时的物质不均匀图景（参见 12.8 节）。

当代宇宙学家认为，30～70 万年时的温度起伏又起源于更早时期的宇宙暴胀阶段（见 12.7 节）。那时的急速暴胀，足以使微观尺度上的量子起伏发展为宏观尺度上的扰动，那才是今日宇宙非均匀结构的源头。

以上就是标准宇宙模型所描述的宇宙创生的大致过程。标准模型并不是终极理论，它本身仍有一些说不清楚的地方。但是，正如温伯格所说：“即使将来它被别的理论取代了，它毕竟在宇宙学的历史里起过重要的作用。新的理论很可能是由于受到标准模型的启发而进行观测和计算得到的。”（光盘图 12.6.2　从大

爆炸至今的宇宙进程）描述了从大爆炸至今的宇宙进程。

2006 年 9 月日本天文学家宣布，8 米口径的 SUBARU 望远镜发现红移量为 6.964 的星系，距离 128.8 亿光年，认为比以前发现的星系都更加遥远，更接近“黑暗年代”（光盘图 12.6.3　SUBARU 望远镜拍摄到的遥远星系）。

2007 年 7 月，美国天体物理杂志发表加利福尼亚理工学院斯塔克（D. P. Stark）和埃里斯（R. S. Ellis）等的文章，宣布他们观测到 6 个迄今最遥远、最古老的星系：3 个在室女座 Abell 1689 星系团方向，2 个在武仙座 Abell 2219 星系团方向，1 个在双鱼座 Abell 68 星系团方向，距离都在 132 亿光年以上。新发现的 A1689C3 星系的光谱中，有一条氢原子的赖曼阿尔法谱线，它的标准波长是 0.121 6 微米，而实际观测到的波长变成 1.259 微米，从紫外波段位移到了近红外波段，红移量高达 9.35，据此算出其距离为 134.47 亿光年。其他 5 个星系的红移量为 8.5～10.4，距离都在 132 亿光年以上。

如此遥远的星系，本应非常暗弱。幸亏“引力透镜效应”使其亮度增强了 20～50 倍，而被哈勃空间望远镜捕捉到它们的身影。其中 A1689C1、A1689C2、A1689C3 三个遥远星系，对它们产生“引力透镜效应”的天体是 10.8 节介绍过的室女座 Abell 1689 星系团（光盘图 10.8.11　Abell 1689 引力透镜效应）。光盘图 12.6.4 是 Abell 1689 星系团中心局部区域，适当旋转以与光盘图 12.6.5 相对照（光盘图 12.6.4　Abell 1689 中心局部区域）。光盘图 12.6.5 指示三个遥远星系经“引力透镜效应”放大后暗弱图像的位置（光盘图 12.6.5　因引力透镜效应而显现的三个遥远星系）。加利福尼亚理工学院的研究小组先从哈勃望远镜的照片上寻找到这些暗弱图像，再用凯克Ⅱ 10 米望远镜的近红外光谱仪拍下光谱，最后完成他们的发现。这次发现提供了何时结束“黑暗年代”的最新信息，所以格外引人注意。2008 年 9 月 11 日，钱德拉望远镜还公布了 Abell 1689 的 X 射线图像（光盘图 12.6.6　Abell 1689 的 X 射线图像），弥漫着蓝色的高温气体，表明有巨型黑洞存在。

12.7　宇宙极早期的暴胀模型

标准大爆炸宇宙模型描述的是宇宙时标万分之一秒以后的演化进程。至于更早期的宇宙历史，虽然时间只短到万分之一秒，却是很难追溯的难点之所在，或者说，在那万分之一秒内发生的事情与当代人类知识之间还隔着重重帷幕，当代科学家也许只能稍稍掀开帷幕的一角，窥测到些许蛛丝马迹，并就看到的情形加以推测和揣摹，将宇宙极早期的历史追溯到 10^{-36} 秒。描述这一段宇宙极早期演化进程的模型称为暴胀模型。

在这万分之一秒中隐藏着的重大的宇宙秘密有：奇点问题，视界疑难，平直

性疑难和磁单极疑难。其中最困难的奇点问题留待本章最后一节去探讨，本节先介绍一下暴胀模型所能解释的另外三项疑难。

12.7.1 视界疑难

本节所谓的视界不是黑洞周围的视界，而是指在宇宙中某一地点，所能看到的最大的宇宙范围。这个范围的大小受到光速和宇宙年龄的限制。根据相对论，光速是一切信号传递所能达到的最高速度，它1秒钟传递30万千米，1年传递1光年。现今我们所处的宇宙，年龄按150亿岁计，我们所看到的宇宙中离我们最远的天体距离不能超过150亿光年。因为更遥远的事物，其信号即使从宇宙创生时即开始传递，至今还没有传到我们这里来，所以宇宙当前的视界等于150亿光年。当代天文观测确实已经看到了接近于150亿光年远处的天体（类星体即为一例）。天文观测事实及宇宙学原理告诉我们，150亿光年远处的景物同我们周围的景物没有什么特殊两样之处，说明当今宇宙的空间范围至少不小于150亿光年的尺度范围，而且在这个尺度范围内，宇宙物质的分布大体上是均匀的。

以核物理理论为基础的标准大爆炸宇宙模型认为，从创生以来不断膨胀的宇宙，其空间尺度扩张的程度分两个阶段同时间相关联：在创生70万年以前是以能量（光子）为主的时期，光子的密度大于物质粒子的密度，宇宙尺度因子$R(t)=K\sqrt{t}$；在70万年以后是以物质为主的时期，光子的密度小于物质粒子的密度，宇宙的尺度因子$R(t)=K't^{2/3}$；K和K'是比例常数，t是从创生起算的宇宙年龄。

以当今宇宙的$t=150$亿年和宇宙尺度范围的下限值$R(150\text{亿年})=150$亿光年$=1.4\times10^{28}$厘米，可以计算

$$K' = R(150\text{亿年})/t^{2/3} = 1.4\times10^{28}\text{厘米}/(150\text{亿年})^{2/3}$$

并据此计算宇宙创生70万年时，宇宙尺度范围的下限值为

$$R(70\text{万年}) = K't^{2/3} = \frac{1.4\times10^{28}\text{厘米}}{(150\text{亿年})^{2/3}}\cdot(70\text{万年})^{2/3} = 1.83\times10^{25}\text{厘米}$$

但是在70万年时的视界只有70万光年$=6.6\times10^{23}$厘米，可见当时视界所及小于宇宙尺度范围的1/25。

往前回溯到宇宙创生万分之一秒以前的一点：$t=10^{-36}$秒。那时的视界为10^{-36}秒$\times30$万千米$=3\times10^{-26}$厘米。而用同上的方法计算当时的宇宙尺度范围下限$R(10^{-36}\text{秒})=K(10^{-36}\text{秒})^{1/2}$，式中，$K$值用70万年时的数值加以计算

$$K = R(70\text{万年})/\sqrt{t} = 1.38\times10^{25}\text{厘米}/\sqrt{70\text{万年}},$$

可得

$$R(10^{-36}\text{秒}) = \frac{1.83\times10^{25}\text{厘米}}{\sqrt{70\text{万年}}}\sqrt{10^{-36}\text{秒}} = 3.8\text{厘米}$$

以上计算结果可以简列于表 12.7.1。

表 12.7.1　视界与宇宙尺度范围

时　间	视界/厘米	宇宙尺度范围下限/厘米	视界/尺度下限
现在	1.4×10^{28}	1.4×10^{28}	1
70 万年时	6.6×10^{23}	1.83×10^{25}	4×10^{-2}
10^{-36}秒时	3×10^{-26}	3.8	10^{-26}

在 10^{-36}秒时，视界竟然为宇宙尺度范围的 $1/10^{26}$，即在当时的宇宙中，可视范围只是非常非常小的一个局部。视界意味着信号联系所及的范围，视界以外的世界，连最快速的光子都不能到达，彼此之间不可能有任何因果联系。当宇宙年龄只有 10^{-36}秒的时候，没有任何因果联系、互无影响的宇宙区域居然广泛存在于有因果联系的视界范围之外，体积比视界范围大 $(10^{26})^3=10^{78}$倍。那么多互无影响的宇宙区域，怎么能要求它们有大体一致的性质，而演化成今日宇宙的各向同性？这个不可思议的问题就是所谓"视界疑难"。

12.7.2　平直性疑难

在广义相对论的理论架构中，按弗里德曼的膨胀宇宙的基本方程，在一个不断膨胀的四维球体的三维球面上，宇宙线元的表达式为

$$dl^2=R(t)^2\left(\frac{dr^2}{1-kr^2}+r^2d\theta^2+r^2\sin^2\theta d\varphi^2\right)$$

式中，r、θ、φ 是极坐标下的三个维度，$R(t)$ 称为罗伯逊（Robertson）—华格（Walker）宇宙尺度标度因子。k 称为空间曲率指数，只能取 3 个值，即 -1，0，$+1$。所谓线元是指从点（r、θ、φ）到点（$r+dr$、$\theta+d\theta$、$\varphi+d\varphi$）之间的距离。注意：从观测者到点（r、θ、φ）的距离并不是 r，而是 l，称为"流形距离"。重要的概念上的区别是：欧氏空间与真实宇宙空间的区别。

当 $k=+1$ 时，r 的取值只能小于 1，否则 dl 变成虚数，没有意义。这时的 $R(t)$ 值相当于宇宙的实际半径，宇宙是有限的、封闭的，称为闭宇宙。

当 $k=-1$ 时，r 可取任意值，$R(t)$ 只是宇宙中某个典型的尺度，宇宙是无限的、开放的，称为开宇宙。

当 $k=0$ 时，r 也可取任意值，宇宙也是无限的，但这个宇宙没有曲率，是一个平直宇宙。

根据弗里德曼于 1922 年从爱因斯坦场方程导出的宇宙动力学基本方程，或称弗里德曼方程

$$\frac{1}{R^2}\left(\frac{dR}{dt}\right)^2+\frac{2}{R}\frac{d^2R}{dt^2}=-\frac{kc^2}{R^2}$$

式中，$\frac{d^2R}{dt^2}$是宇宙膨胀的加速度。产生这个加速度的力与宇宙中所有物质产生的引力相平衡，才能保持宇宙膨胀的匀速性。于是，引力 $F=G\frac{Mm}{R^2}$，与产生加速度的力 $F'=m\frac{d^2R}{dt^2}$大小相等，方向相反：$F=-F'$，即$\frac{GM}{R^2}=-\frac{d^2R}{dt^2}$，由于 $M=\frac{4}{3}\pi R^3\rho$，ρ 是宇宙物质的平均密度，便

可得

$$\frac{\mathrm{d}^2R}{\mathrm{d}t^2}=-\frac{4}{3}\pi G\rho R$$

再根据哈勃定律，$\frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}t}=HR$，代入弗里德曼方程，即可获得$k$的表达式为

$$k=\frac{R^2}{c^2}\left(\frac{8\pi G\rho}{3}-H^2\right)$$

式中，c是光速，G是万有引力常数，ρ是宇宙平均物质密度，R是宇宙尺度因子，H是哈勃常数。有时也称此表达式为弗里德曼方程。如果$k=0$，则$\frac{8\pi G\rho}{3}-H^2=0$，此时宇宙物质的平均密度$\rho_c=3H^2/8\pi G$，称为临界密度。$k=0$是临界情形，与之对应的宇宙是平直的无限宇宙。$H$名为常数，实际仍随时间变化。宇宙膨胀的速度受到物质引力的反抗作用而长期减慢，H值逐渐减小，ρ_c值也随时间变化。对于当前宇宙，取$H=70.5$千米/秒/百万秒差距，$\rho_c\approx 9.33\times10^{-30}$克/厘米^3。

如果$\rho>\rho_c$，则$k>0$，只允许$k=+1$，宇宙是闭宇宙；如果$\rho<\rho_c$，则$k<0$，只允许$k=-1$，宇宙是开宇宙。闭宇宙是有限的（$k>0$），R相当于宇宙半径；开宇宙是无限的（$k<0$），没有有限半径，R只是宇宙中的某个典型尺度，ρ的值根据这个典型尺度里的物质分布加以计算。

将$\rho_c=3H^2/8\pi G$代入k的表达式，可得

$$k=\frac{8\pi GR^2}{3c^2}(\rho-\rho_c)$$

令$\Omega=\rho/\rho_c$，则

$$1-\frac{1}{\Omega}=\frac{3kc^2}{8\pi G\rho R^2}$$

在宇宙以物质为主的时期，$\rho\propto R^{-3}$，这时有

$$\rho R^2\propto R^{-1},\quad 1-\frac{1}{\Omega}\propto R$$

在宇宙以能量（光子）为主的时期，$\rho\propto R^{-4}$，这时有

$$\rho R^2\propto R^{-2},\quad 1-\frac{1}{\Omega}\propto R^2$$

极早期宇宙R非常小，当时标只有10^{-36}秒的时候，可以计算$1-\frac{1}{\Omega}\approx10^{-55}$，即$\Omega$非常接近于1，物质密度几乎严格等于临界密度，即一个概率很小的密度。这是偶然的吗？还是有什么特别的机制造成的？这一难题称为平直性疑难。

12.7.3 磁单极疑难

电荷有正负之分，质子和正电子带正电，电子和反质子带负电。一般物体所带的正电荷与负电荷相等，处于电中和状态，是中性的。带电物体所带正电荷多于负电荷，表现为正电性，为带正电荷的物体；反之，所带负电荷多于正电荷，表现为负电性，为带负电荷的物体。自然界和人工实验室里存在带单一电荷的物

体是司空见惯的。

磁也有正负之分，但磁性物体总是同时带有正磁极和负磁极。一根细细的磁针指向地球的南北磁极，磁针的正磁极和负磁极分别处于磁针的两头。如果把磁针从中间断开，半截磁针仍然指向地球的南北磁极，磁针两头仍然是正磁极和负磁极。无论切断多少次，剩余的磁针再短，也仍然是一头正磁极，另一头负磁极，从来没有发现过只带正磁性或只带负磁性的物体，只带单一磁荷的物体在宇宙中从来没有被发现过。

电子、质子等都是带有单一电荷的物质粒子，那么是否存在带有单一磁荷的粒子呢？量子力学的奠基人之一狄拉克，在 20 世纪 30 年代提出了“磁单极”的概念，磁单极就是带有单一磁荷的粒子。狄拉克指出，如果有了磁单极，电荷的量子化问题就非常容易理解了。理论计算表明，磁单极的质量约为 0.02 毫克，是质子质量的 10^{16} 倍。磁单极产生于早期宇宙中微观能量场取向失配的地方，它位于彼此没有信号联系的小区域之间的边界上。在讲述视界疑难的时候提到过，在宇宙创生 10^{-36} 秒的时候，彼此没有信号联系的小区域的半径是宇宙尺度范围的 10^{-26}，失配之处多达 $(10^{26})^3=10^{78}$ 个，磁单极应大量产生，而它们又极少湮灭。宇宙膨胀到今天，磁单极应随处可见，而且不难检测，可实际上一个也没有找到，这就是磁单极疑难。

1982 年 2 月 14 日，正值西方的情人节，美国斯坦福大学的卡伯来拉 (B. Cabrera)宣称他的超导量子干涉仪记录到一次磁单极事件，可是此后着意搜寻数百次，再也没有发现第二次事件来证明首次发现的可靠性，其他所有企图寻找磁单极的实验都以失败而告终。

12.7.4　暴胀模型对疑难的化解

1981 年，美国麻省理工学院的青年粒子物理学家古斯（A. H. Guth）提出一种极早期宇宙演化的模型，能够解释上述三个疑难，那就是暴胀模型。这一模型认为，在宇宙创生 10^{-35}～10^{-32} 秒，宇宙以大大高于正常的速度急速膨胀——暴胀。在 10^{-35} 秒之前，宇宙空间尺度范围不是像前面计算的那样大（3.8 厘米)，而是比视界（3×10^{-26} 厘米）小很多。后来的宇宙空间尺度范围是由于暴胀而急速胀大的。暴胀的程度居然使宇宙在极短的 10^{-32} 秒时间内，尺度扩大了 10^{43} 倍！这样一来，视界疑难就被克服了，不存在没有因果联系的区域；也回避了磁单极疑难——并不是磁单极不能存在，而是在今天所观测到的宇宙范围内一直没有提供磁单极生成的条件；今天所观测到的宇宙只是来自暴胀前一个均匀区域内的一小部分，而磁单极只能在区域之间的交界处产生。至于平直性疑难，暴胀模型暗示 $\Omega=1$ 不是偶然的，宇宙应当是平直的，把一个疑难问题变成了一个肯定的问题。暴胀模型成功地化解了上述三个疑难。

宇宙温度是与宇宙尺度成反比的。宇宙的暴胀意味着温度的猛降。暴胀阶段结束时，宇宙尺度猛增了几十个量级，温度也猛降了几十个量级。暴胀阶段过去之后，通过大量粒子产出的过程使宇宙重新加热，回到标准大爆炸模型所描述的正常演化轨道上来。图 12.7.1 给出了暴胀阶段前后宇宙温度和尺度演化的示意图。光盘图 12.7.2 是宇宙暴胀及以后的几个阶段示意图（光盘图 12.7.2　宇宙暴胀及以后的几个阶段），在 10^{-32} 秒之前是宇宙暴胀阶段，70 万～5 亿年为“黑暗年代”。宇宙的暴胀使空间尺度猛增，速度远远超过光速，岂不违背相对论？回答是没有。因为相对论限制任何物体的运动速度不能超过光速，而空间的暴胀不涉及任何物质粒子的运动。

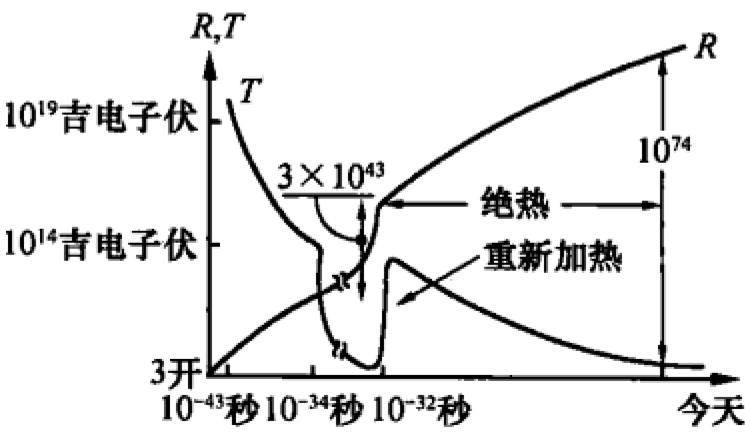


图 12.7.1　暴胀阶段宇宙温度和尺度的变化

宇宙极早期暴胀模型的理论依据，是基本粒子物理学中将弱作用、电磁作用和强作用统一在一起的大统一理论。当代科学确认，支配物质世界的力共有四种。按作用强度排序为：强相互作用力、电磁力、弱相互作用力和万有引力（表 12.7.2）。

表 12.7.2　宇宙中的四种力

力的种类	相对强度	作用距离/米	作用物体
万有引力	10^{-40}	∞	一切物体
电磁力	10^{-2}	∞	带电物体
弱相互作用力	10^{-12}	$<10^{-17}$	强子、轻子
强相互作用力	1	10^{-15}	强子

强相互作用力与弱相互作用力是短程力，只有在原子核尺度上才能显现。在宏观和宇宙尺度上，起作用的只有电磁力和万有引力。万有引力的量级比电磁力小得多，强度比为 $1:10^{38}$，但对于电中性物体，电磁力中的吸引与排斥相互抵消，不显现其作用，只有引力长存于一切物体之间，在宇宙中起着主宰的作用。然而在宇宙创生的极早时期，所有物质都挤在比原子核更小的尺度内，那时的四种相互作用力是统一在一起的，随着宇宙膨胀和温度的降低才逐一产生各种相互作用。图 12.7.3 示意了它们逐一产生的过程。在宇宙历史的 10^{-44} 秒以前，时间和空间都小于量子化的普朗克尺度（见 10.9 节），时空还没有独立形成，不能区分四种相互作用，称为普朗克时代；从时空起源的 10^{-44} 秒开始，引力被分离出来，其余三种作用统一在一起，称为“大统一”时代；在 10^{-36} 秒时，强作用产生，但弱作用与电磁作用仍然统一在一起，重子和反重子数失衡，宇宙开始出现

不对称性；在 10^{-10}秒时，弱作用同电磁作用分离，宇宙出现了更多的不对称性。以后的几步演化进程，我们在前面已经叙述过了。

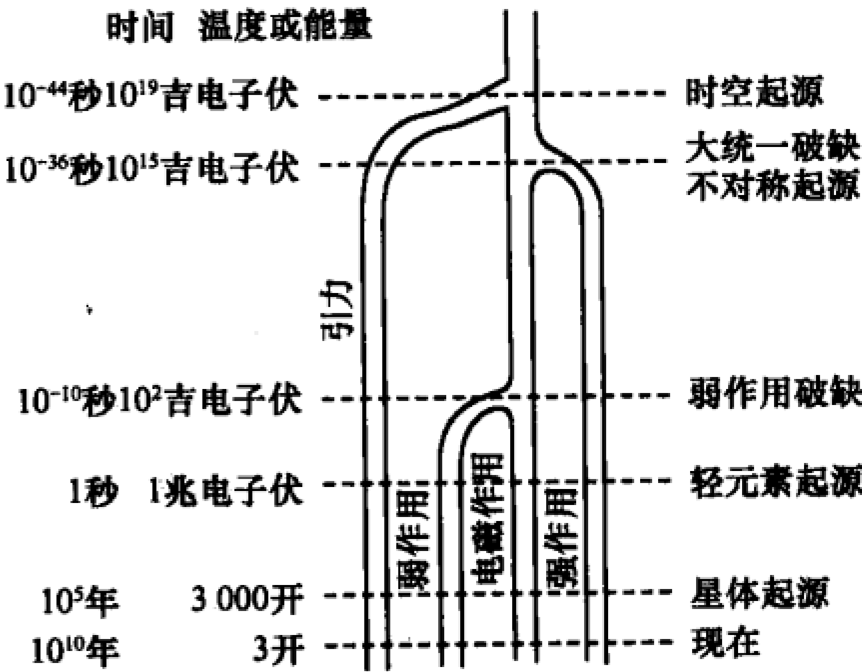


图 12.7.3　各种相互作用由大统一产生的过程

至此，我们可以列出一张包括暴胀过程在内的宇宙演化进程简表（表 12.7.3）。

表 12.7.3　宇宙演化进程简表

画面	时标	温度/开	时　代	物理过程
	10^{-44}秒	10^{32}	普朗克时代	时空量子化，四种作用统一
	10^{-36}秒	10^{28}	大统一时代	引力单独起作用，重子不对称性形成，宇宙暴胀
1	10^{-4}秒	10^{13}，>强子阈温	强子时代	夸克“渐近自由”，光子数与粒子数平衡，正物质∶反物质=10 亿+1∶10 亿
2	10^{-2}秒	10^{11}，<强子阈温	轻子时代	轻子∶强子=10 亿∶1，质子∶中子=50∶50
3	13.82 秒	30 亿，<轻子阈温	轻子时代结束	质子∶中子=83∶17
4	3 分 46 秒	9 亿	核合成时代	物质全部产生出来，自由中子消失，质子∶中子=87∶13，H∶H_e=74∶26
5	30 万至 70 万年	4 000 至 3 000	复合时代	物质与辐射脱离（退耦），光子自由穿行，光明宇宙诞生；自由电子消失，稳定原子形成
6	70 万至 5 亿年	100	黑暗年代	引力上升为主要作用力，物质粒子开始聚集成团，直至第一批恒星诞生，宇宙中的氢、氦原子再次电离
7	137 亿年	2.7	现代	星系等宇宙大尺度结构早已形成。新恒星不断诞生、演化，超新星时有爆发，出现行星、生物、人

从表12.7.3可以清楚地看到，我们今天的物质世界是在约100多亿年的时间内，通过许多时代，由一连串的物理过程逐步形成的。但从时间进度来看，我们不禁惊讶，宇宙中丰富多彩的物质居然在宇宙刚降生的最初3分46秒钟里就基本完成了创造任务，而宇宙物质得以保存和发展的前提来自重子数与反重子数失衡的不对称性，其基础居然是在最初的10^{-36}秒之内奠定的。由人类已经清楚掌握的粒子物理理论，不难理解这样的进程不仅不是不可思议，反而是理所当然的，惟其如此才能造就以后发展起来的斑斓的宇宙。今天的物质世界之所以丰富多彩，是因为有各种各样的化学元素，但所有氢以外的化学元素没有中子是不可能形成的，而中子如果不在最初3分46秒里躲进氦原子核中保藏起来，这个世界就根本不会有中子。值得惊讶的是宇宙创生时期进展过程的高效率。为什么在如此短的时间内能够完成如此艰巨的奠基任务？答案也不难理解，关键在于温度。温度的物理实质是粒子碰撞所产生的能量。碰撞越频繁，温度越高，效率就越高。煤的燃烧是碳元素强烈氧化的过程。在常温下，煤不会燃烧，由煤生成二氧化碳的效率是极低的，可是在高温下，碳原子与空气中的氧原子频繁地、强烈地碰撞，煤就熊熊燃烧起来。这是我们所熟知的温度与效率相关的明显的例子。宇宙早期的那种高温高密状态，光子和物质粒子碰撞极为频繁，宇宙创生过程的高效率——1秒等于100亿年——就在情理之中了。

12.8 21世纪的两朵乌云——暗物质和暗能量

19世纪与20世纪之交，有两朵小小的乌云，竟然酝酿出漫天的狂飙，动摇了几个世纪以来建成的物理学大厦。雨过天晴，相对论和量子力学这两座全新的现代物理学理论架构巍然耸立，人类社会进入科学技术迅猛发展的新时期。

20世纪与21世纪之交，又有两朵小小的乌云，涌现天际……

12.8.1 开宇宙和闭宇宙

举世公认的标准宇宙模型指出，现实宇宙起源于137亿年前的一次大爆炸(突发性的空间膨胀事件)。直到今天，膨胀仍在继续。未来宇宙将会一直膨胀下去？还是膨胀到一定程度重又收缩回来？这与整体宇宙的物质平均密度有关。

12.7节介绍平直性疑难的时候，已经提到过宇宙物质平均密度的概念，那是以广义相对论为基础进行讨论的。我们也可以不用相对论而用比较直观的牛顿力学来类比宇宙的未来问题以及这一问题与宇宙物质平均密度的关系。

每当我们看到一块被抛掷而上升的石头时，总会意识到，不久它就会受地球引力作用而掉落下来。可是，如果石头向上运动的速度超过地球的逃逸速度，它就永远不会掉下来了。宇宙的膨胀是当初大爆炸给它的力，如果膨胀运动所具有

的速度超过由宇宙质量决定的逃逸速度，那么膨胀就将永远继续下去；反之，如果膨胀运动速度小于逃逸速度，膨胀终会停止并转而收缩。临界情况就是两个速度刚好相等，与之相应的宇宙物质密度就是临界密度。

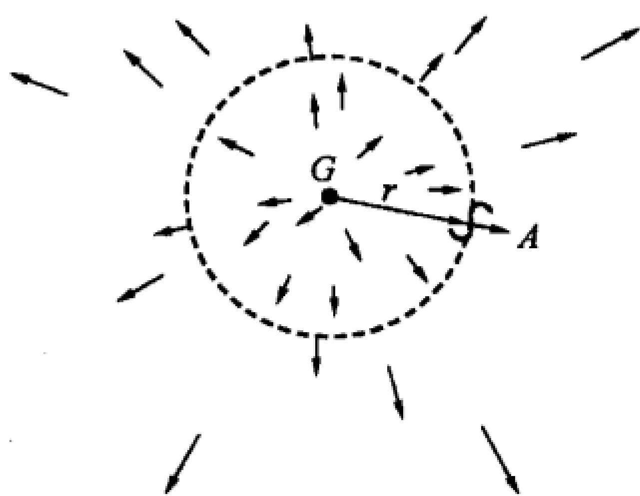


图 12.8.1　计算临界密度的示意图

美国数学家伯克霍夫（G. B. Birkhoff）1923 年就证明过一条定理（图 12.8.1）：在球对称物质系统中，任意半径 r 球面上物体 A 的运动状态，只取决于球内物质的质量，而不用考虑球外物质的质量。如果 A 是离我们 r 远的一个星系，它的膨胀（退行）速度为 $V=Hr$，H 是哈勃常数；它所在位置的宇宙逃逸速度为 $\sqrt{2GM/r}$（见 4.4 节），其中 M 是以 r 为半径的球内的宇宙物质质量，取 ρ 为宇宙物质密度，则 $M=\frac{4}{3}\pi r^3\rho$。从临界情形所要求的条件

$$Hr=\sqrt{\frac{2G}{r}\cdot\frac{4}{3}\pi r^3\rho}$$

可得 $\rho_c=3H^2/8\pi G$。这就是临界密度的计算公式，与由广义相对论推导出的临界密度公式完全一样。取 $H=70.5$ 千米/(秒・百万秒差距)，可得

$$\rho_c=0.933\times10^{-29}\text{ 克 / 厘米}^3$$

这相当于每立方米体积有 6 个质子或中子的质量。在有些文献里，为了更方便在 H 取不同值时进行计算（事实上在宇宙不同时期，H 是有所不同的），引进一个量 h，令 $h=H/100$，约定 H 以千米/(秒・百万秒差距）为单位，则

$$\rho_c=\frac{3\times10^4h^2}{8\pi G}=1.878\times10^{-29}h^2\text{ 克 / 厘米}^3。$$

显然，如果取 $H=70.5$，则 $h=0.705$，$\rho_c=0.933\times10^{-29}$克/厘米^3。

引力是聚向中心的力，它能够制约宇宙膨胀的趋势。如果当今宇宙物质的平均密度小于临界密度，说明宇宙中的物质不够多，所产生的引力不足以抗衡宇宙膨胀的趋势，宇宙就会永远膨胀下去，这样的宇宙称为开宇宙。如果当今宇宙物质的平均密度大于临界密度，引力足以制约宇宙膨胀的趋势，总有一天引力要占上风，膨胀到极致后就会往回收缩，反演原来膨胀的全部过程，又回到 10^{-36}秒，甚至 10^{-44}秒时的状态。引力战胜了其他所有的力，引力使宇宙又复归普朗克尺度以内的状态——人类当前还不能解释的状态。这样的宇宙称为闭宇宙。

宇宙的开闭同时对应着宇宙是无限还是有限的问题。对于开宇宙，空间曲率是负的，宇宙将永远膨胀下去，宇宙空间是无限的；对于闭宇宙，空间曲率是正

的，宇宙将会从膨胀转为收缩，宇宙空间是有限的。对这些论断的严格证明，需要较深的数学和广义相对论知识，这里就不涉及了。但有一点需要说明，不要误解膨胀宇宙在任何时候都是有限的，只有在开宇宙的情况下，无限膨胀以后才成为无限宇宙。实际上，无限宇宙在空间上应当任何时刻都是无限的。即使在极早期，宇宙刚一诞生，它就是无限的。膨胀是从无限膨胀到更大的无限，开宇宙永远在膨胀，而无限空间永远保持着无限性。

在无限膨胀的开宇宙里，随着时间的推移，所有恒星的热核反应将逐渐熄灭，只留下各种各样的遗骸：黑矮星、中子星、黑洞……行星仍然在轨道上运行，但速度将逐渐减慢，宇宙辐射和中微子背景温度将继续下降，粒子的能量不断减少，衰变累累发生。再过若干亿亿亿年之后，黑洞吞噬掉大部分物质，而黑洞又难逃蒸发的命运。所有的物质都衰变殆尽，只剩下稀落的光子和中微子。不会再出现任何重大的物理过程来打破宇宙那空虚荒凉的状态，永久之长，长不可测。在这之前许久，人类以及所有生命早已冻死，不复存在了。

闭宇宙情况完全不同。当前的宇宙膨胀速度逐渐减慢，到达顶点后开始回缩。这段时间究竟有多长，取决于宇宙平均密度超过临界密度有多少。如果超过1%，宇宙回缩的时间会在1万亿年之后；如果超过10%，宇宙的回缩会提早到1 000亿年之后发生。

假定宇宙开始回缩是在1 000亿年以后。在这1 000亿年中，宇宙仍在膨胀，背景辐射温度由3开下降到1开。2 000亿年之后，宇宙已经回缩了1 000亿年，又回到现在宇宙的尺度，但天体状况已有很大变化：黑洞增多而恒星减少了；近处的星反映当前的收缩，表现为蓝移；而远处的星反映的仍是以前的膨胀，表现为红移。再过100亿年，背景辐射温度上升到200开，像地球这样的行星很难把热量散发出去，冰川荡然无存，海洋开始蒸发，人类早已逃离地球转移到温度较低的地方，否则难免热死。当宇宙生命只剩下最后50万年的时候，宇宙早已失去光明，到处一片漆黑，无论人类躲藏到何方，也难逃整个宇宙酷热的煎熬，一切生命都化为乌有。再往后，温度加速上升，直到几十亿开。保存了无数亿年的最稳定的物质结构——原子核已无可挽回地被摧毁殆尽。宇宙虽变得简单却无比凶险。最后，所有物质都因高温高压而不复存在，一切有形的东西都统统毁灭，其中也包括空间和时间本身。剩下的只是一个时空奇点——真正的世界末日。要问末日以后会发生什么是毫无意义的。就像问宇宙创生以前会发生什么一样。从虚无中诞生的宇宙，曾经灿烂辉煌地存在过无数亿年，最后又回到虚无中去，什么也没有留下。

宇宙到底是开是闭，关键在于宇宙物质的平均密度。理论上的临界密度$\rho_0=0.933\times10^{-29}$克/厘米^3，而用天文观测和抽样统计方法得到的，现实宇宙平均密度是0.25×10^{-30}克/厘米^3，宇宙似为开宇宙。但是，观测和统计的对象只

是宇宙中发光的恒星和星系等天体，统称为亮物质。20世纪80年代，天文学家们认为存在大量暗物质，它们与亮物质加在一起，可能会使宇宙物质的平均密度大于临界密度，甚至认为亮物质与暗物质之比为1∶99，因而最终将面临闭宇宙炽热难耐的结局。暴胀理论解决平直性疑难，认为宇宙的空间特性应当是平直的。平直性要求宇宙物质的平均密度等于或者接近临界密度，宇宙刚好处于开闭之间的分界线上。但由于暴胀时间有限，不能充分暴胀，宇宙物质密度可能非常接近但又不完全等于临界密度。完全等于的概率很小，只要略大或略小于临界密度，宇宙依然存在开闭问题。到底是开是闭，一时难下定论。

12.8.2　21世纪的第一朵乌云——暗物质

暗物质是指那些不发出任何辐射因而探测不到的宇宙中的物质。已经死去的恒星的残骸：黑矮星、停发脉冲的中子星、黑洞；暗星云；弥漫于星际和星系际的尘埃和电离气体；还有星团级的和星系级的大黑洞……这些都是暗物质。但所有这些物质加在一起，还是不足以使宇宙平均密度超过临界密度。

根据星系中恒星运动的情况，用力学定律推算出来的星系质量，叫引力质量。而通过统计恒星的个数以及它们发光的情况，得出的质量叫光度质量。结果发现，引力质量总是比光度质量大得多。这是暗物质大量存在的观测证据。因为光度质量只是那些发光物质的质量，而引力质量是发光物质与暗物质加在一起的质量。

6.4节已经讨论过星系边远处的恒星，转动线速度并没有慢下来，表明星系晕中隐藏着大量暗物质。光盘图12.8.2是位于鲸鱼座的一个椭圆星系NGC720，距离8 000万光年（光盘图12.8.2　鲸鱼座NGC720外围的暗物质），右图是地面望远镜拍摄的光学图像，左图是钱德拉空间望远镜拍摄的X图像，显示出光学图像所没有的庞大的热气体外晕，一定有暗物质形成的引力与高温气体的压力相平衡。估计暗物质的质量超过亮物质5倍以上。

对星系团的观测研究也充分说明大量存在暗物质。一些星系团中的星系平均运动速度大到足以摆脱由光度质量估算出来的引力束缚，如果没有大量的暗物质参与组成足够强大的引力束缚系统，星系团早就瓦解了。X射线观测发现很多星系团弥漫着发出强大X射线的高温气体，一定有大量暗物质形成的引力与高温气体产生的压力抗衡，才能维持星系团的稳定性。仙王座星系群NGC2300，距离1.5亿光年，ROSAT卫星拍到其高温X射线热气体，延伸130万光年（光盘图12.8.3　仙王座星系群的热气体）。Abell 2125星系团在大熊-天龙座交界处，距离30亿光年，其中心C153星系周围也有强烈的热气体喷发。6.6介绍过的斯蒂芬五重奏星系群HCG92（光盘图6.6.4），钱德拉空间望远镜拍到弥漫其间的高温X射线气体，范围达28万光年（光盘图12.8.4　星系群HCG92中的热气

体)。著名的后发座星系团中也弥漫着大量高温 X 射线的气体。狮子座 M1054-0321 是拥有数千个星系的星系团，距离 80 亿光年，ROSAT 卫星拍到它 3 亿开 X 射线高温气体（光盘图 12.8.5　星系团 M1054-0321 的 X 图像)。

M1054-0321 曾被认为是星系团中的巨无霸，后来哈勃望远镜又发现一个更大的星系团长蛇座 RDCS1252.9-2927，光盘图 6.6.16 已经出现过它的图像，距离 90 亿光年，质量 200 万亿 $M_{\odot}$（光盘图 12.8.06　星系团 RDCS1252.9-2927)。钱德拉望远镜拍到它更为壮观的图像（光盘图 12.8.07　RDCS1252.9-2927 的 X 射线图像)，漂亮的紫色是发出 X 射线的高温气体，温度达 7 000 万开。

诸多观测证据表明暗物质的大量存在，但暗物质的主体是什么物质，现在还不甚清楚。我们日常所见的一切物体，都是由原子组成的，而任何原子都离不开中子、质子等重粒子成分。人们一直猜想，暗物质的主体是重粒子以外的东西，这些神秘莫测的小粒子也许会起着决定宇宙未来前途命运的关键作用。它们像是在宇宙中到处游荡的幽灵，人们现在还无法得知其庐山真面目。

曾经以为暗物质的主体是中微子。根据宇宙创生理论，宇宙中的中微子数目与光子数大体一致，约为每立方厘米 400 个。光子没有静质量，动质量的总量也很小。中微子有没有静质量的问题成为影响宇宙命运的举足轻重的问题。简单的计算表明，中微子静质量只要达到 2×10^{-32} 克（电子质量的 4.5 万分之一)，仅中微子一项，造成的宇宙平均密度即为 $400\times2\times10^{-32}$ 克/厘米$^3=8\times10^{-30}$ 克/厘米^3，已经接近临界密度。

20 世纪 30 年代泡利从理论角度提出中微子概念的时候，认为中微子没有静质量。20 世纪五六十年代，从基本粒子实验中找到了电子中微子和 μ 中微子存在的证据。1998 年 7 月，美国费米国家加速器实验室又找到了第三种中微子 τ 中微子的踪迹。一些迹象表明，中微子静止质量不为零。1997 年 7 月 29 日，日本东京大学宇宙研究所户冢洋二在德国汉堡举行的基本粒子理论国际研讨会上宣布找到了中微子存在静质量的证据，1998 年 6 月 5 日又进一步肯定了这一发现（见 9.1 节)。虽然中微子静质量的确切数字还难以给出，但已给出其下限为 500 万分之一电子质量。由基本物理常数，电子质量为 $m_e=9.1\times10^{-28}$ 克，中微子静质量至少为 1.8×10^{-34} 克。

20 世纪 90 年代提出冷暗物质和热暗物质的概念。实际观测和理论研究判定宇宙暗物质的主体是冷暗物质。中微子属热暗物质，质量小，运动速度快。质子和中子虽属冷暗物质，但自由中子寿命很短，质子有很强的相互作用能力。它们都不可能成为暗物质的主体。2003 年，天文观测获得重大发现。美国《科学》周刊全球十大科技成果之首是“宇宙微波辐射各向异性探测器”（WMAP）和“斯隆数字巡天”（SDSS）相互印证的成果。SDSS 是美国大学天文联盟主持的国际研究项目。WMAP 是一颗人造小行星，2001 年被送入太空，在离地球 150 万

公里远处，绕太阳公转（光盘图 4.2.4）。根据 WMAP 的观测，得到宇宙 37.7 万岁时的宇宙物质不均匀图景，比 1989 年 COBE 卫星得到的清楚、精致得多（光盘图 12.8.8　37.7 万岁时的宇宙图景）。上部是 COBE 得到的，下部是 WMAP 得到的图景。WMAP 的图景中细密的结构，代表当时宇宙各处能量或者温度的起伏。正是这些微小的、随机的起伏，经过 100 多亿年的漫长岁月，才演化成今日多彩斑斓的宇宙（光盘图 12.8.9　宇宙结构逐渐演化的过程）。WMAP 与 SDSS 的工作，进一步印证了宇宙空间的平直性和以冷暗物质为主体的结论，并获得了一系列重要的宇宙数据。2008 年 11 月整理完成了 WMAP 五年工作成果，同时公布了将于 2009 年出版的《天体物理学杂志》预印本。在宇宙学重要参数中，使用 WMAP 与 SDSS 以及对 Ⅰa 型超新星的观测资料得到的值，应当是迄今为止最可信的宇宙学基本数据：

宇宙真实年龄　　$t_0=137.2\pm1.2$ 亿年
哈勃常数　　$H_0=70.5\pm1.3$ 千米/秒/百万秒差距
重子物质的密度　　$\Omega_b=0.0456\pm0.0015$
暗物质的密度　　$\Omega_c=0.228\pm0.013$
暗能量的密度　　$\Omega_\Lambda=0.726\pm0.015$
宇宙退耦时的红移量　　$z^*=1090.88\pm0.72$
宇宙退耦时的年龄　　$t^*=376971^{+3162}_{-3167}$ 年
宇宙再电离时的红移量　　$z_{\rm reion}=10.9\pm1.4$
宇宙再电离时的年龄　　$t_{\rm reion}=4.32^{+0.90}_{-0.67}$ 亿年
宇宙总密度　　$\Omega_{\rm tot}=1.0050^{+0.0060}_{-0.0061}$

在理论上应有（参见 12.8.3 小节）$\Omega_m+\Omega_\Lambda+\Omega_k=1$。其中 $\Omega_m=\Omega_b+\Omega_c$，为物质（包括重子物质和暗物质）密度，$\Omega_\Lambda$ 为暗能量的密度，Ω_k 为空间曲率参数。Ω_k 在以上数值表中没有列入，但在文章摘要中提到：$-0.0179<\Omega_k<0.0081$。

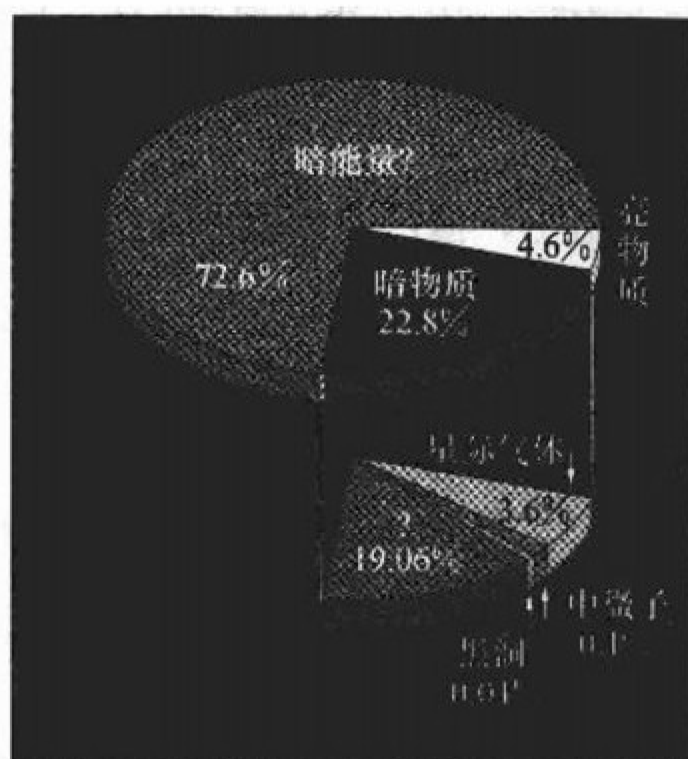


图 12.8.10　宇宙密度分布图

从以上数据，可以看到，在理论上的临界密度中，物质的平均密度只占 27.36%，而在 27.36% 的物质中，亮物质只占 4.56%，余下的 22.8% 属于暗物质；而在 22.8% 的暗物质中，星际气体占 3.6%，中微子占 0.1%，黑洞占 0.04%，余下的 19.06% 是暗物质的主体（图 12.8.10）。这些主体暗物质应为冷暗的非重子物质，而且兼有质量大、寿命长、作

用弱三种特性。现在已知的各种物质粒子中，没有一种符合条件。在理论的临界密度中，物质以外的 72.6%属于“暗能量”。

一些粒子物理学家预言存在着一种相互作用很弱但质量较重的类中微子粒子，称为 WIMP$_s$（weakly interacting massive particle），它们具有 2～3 倍于质子的质量。尽管地面实验室中还没有探测到这种粒子，美国和欧洲的一些大型加速器都已制定了要探测这种粒子的计划。暗物质的谜团还远远没有揭开。

中国科学院和中国工程院院士评选 2006 年世界十大科技成果之一是：美国天文学家宣布首次发现宇宙暗物质存在的直接证据（光盘图 12.8.11 船底座星系团 1E0657-56 综合图像）。星系团 1E0657-56 又称“子弹星系团”(bullet cluster)，位于船底座，距离 34 亿光年。它是由两个大的星系团碰撞合并形成的。光盘图 12.8.11 是综合图像，其中的红色区域是钱德拉望远镜拍摄的 X 图像，属于碰撞产生的高温气体；白色和黄色的众多星系是哈勃望远镜和美国 6.5 米麦哲伦望远镜拍摄的（光盘图 12.8.12 船底座星系团 1E0657-56 光学图像）；综合图像中的蓝色区域是根据星系团中的暗物质造成的引力透镜效应描绘出来的。引力透镜效应使更远方的星系畸变或产生多重像。根据畸变的大小和情况可以为产生引力透镜效应的暗物质定位（光盘图 12.8.13 船底座星系团暗物质分布图像）。天文学家虽然不能直接看到暗物质，但可以通过上述高超的技术，描绘出它们分布的图像。这些图像清楚地显示出，在星系团碰撞的过程中由普通（重子）物质组成的高温气体与暗（非重子）物质都对称地分离了，而暗物质比普通物质分离得更远一些。原因是重子物质之间有相互作用力，起到阻滞作用，而非重子物质之间没有。这些图像的拍摄时间是 2004 年 8 月 10～15 日，共用 140 小时。图像释放时间是 2006 年 8 月 21 日。

2007 年 8 月 16 日和 2008 年 8 月 27 日，钱德拉和哈勃望远镜又释放两张类似的照片：猎户座 Abell 520 星系团，距离 24 亿光年（光盘图 12.8.14 猎户座 Abell 520 星系团综合图像）；鲸鱼座 MACS J0025.4-1222 星系团，距离 59 亿光年（光盘图 12.8.15 鲸鱼座 MACS J0025.4-1222 星系团综合图像）。2007 年 5 月 15 日，哈勃望远镜释放一张双鱼座 CL0024＋17 星系团拥有暗物质环的图像，也是根据引力透镜效应描绘出来的（光盘图 12.8.16 双鱼座 CL0024＋17 星系团暗物质环）。暗物质环的跨距达 260 万光年，星系团的距离是 50 亿光年。描绘暗物质环的引力透镜效应的原图见光盘图 12.8.17（光盘图 12.8.17 双鱼座 CL0024＋17 星系团引力透镜效应）。

应根据引力透镜效应描绘暗物质的方法，欧洲和美国的科学家 2007 年 1 月 7 日首次公布了局部宇宙空间暗物质分布的三维图（光盘图 12.8.18 暗物质分布的三维图），被列入中国两院院士评选的 2007 年世界十大科技成果之一。这是位于六分仪座的一片天区，2.2 平方度，相当于 9 个满月的面积（光盘图

12.8.19　暗物质分布的天区范围)。距离分 3 个层次：35、50 和 65 亿光年，空间分布尺度为 0.6～1 亿光年。70 位天文学家分析了哈勃望远镜花 1 000 小时拍摄的 575 幅照片，找出 50 万个受引力透镜效应畸变的星系，还使用了欧洲的 ESA-XMM 空间望远镜和 ESO-VLT4×8.2 米地面望远镜，日本的 SUBARU 8.3 米地面望远镜以及美国的 VLA 射电望远镜阵的资料。

人类的存在有赖于地球和太阳，地外生命的存在想必也是以星体的存在为前提的。但是从更深更广的意义上说，人类及一切生命形式更有赖于那些游离于星体之外的微乎其微的非重子物质，那些看不见也探测不着的暗物质。人们惊讶地发现，自然科学发展到今天，对宇宙的总体认识，只有不足 5%的亮物质算是被了解清楚了，加上朦胧莫测的暗物质，也只占到理论临界密度的 27%。按照宇宙平直性的要求，还应当有 73%的物质，那又是什么？人类更加茫然了。在进入世纪之交的时候，天文学和物理学家共同猜测，那是：

12.8.3　21 世纪的第二朵乌云——暗能量

暗能量不同于暗物质。暗物质虽然用接收辐射的办法探测不到，但它和亮物质一样有引力，可成团。而暗能量不仅探测不到，而且不成团，是均匀的、分散的；不仅没有引力，而且还有斥力。

暗能量可能与真空涨落有关。在量子力学形成之初就曾提出过真空涨落的概念。在有物质的地方，当温度降到绝对零度时，物质粒子的运动不可能完全停下来，否则，将违背量子力学中的测不准原理。在没有物质存在的真空，若不违背测不准原理，应当充满着随机涨落的能量：一些区域从别处“借取”正能量，造成那里出现负能量，然后又相反。这种迅速的、持续不断的、随机的能量借还过程称为真空的涨落。维持涨落的能量叫做真空零点能。真空中不断出现具有正能量的正物质粒子和具有负能量的负物质粒子，即所谓正负虚粒子对。它们迅速地随机产生又随机湮灭，宏观上保持着真空状态。虚粒子对的存在已为现代物理实验所证实。

真空无所不在。任何组成常规物质的原子内部，除原子核和电子以外的空间，都是真空地带。在辽阔的宇宙里，那些没有任何实物粒子、甚至没有任何场物质存在的真空，占领着绝大部分的空间。由真空涨落表现出来的能量是否就是占主导地位的宇宙暗能量呢？按理论推测，暗能量具有负引力即斥力。爱因斯坦当年发表他的宇宙模型理论时，曾经增加一个宇宙项，但很快又被他自己否定了(见 12.3 节)。宇宙项是斥力的表现；现在看来，宇宙可能真的存在斥力，宇宙项也就加对了。爱因斯坦有知，是否要来一次否定之否定？曾以为牛顿发现的万有引力是主宰宇宙天体的力；现在看来，还需加上暗能量的万有斥力才是完备的。

12.7.3 小节关于平直性疑难的介绍中，提到过宇宙动力学的基本方程（弗里德曼方程）

$$k=\frac{R^2}{c^2}\left(\frac{8\pi G\rho}{3}-H^2\right)$$

还推导出$\frac{\mathrm{d}^2R}{\mathrm{d}t^2}=-\frac{4}{3}\pi G\rho R$。可见：只要宇宙物质平均密度 $\rho\neq0$，宇宙膨胀的加速度$\frac{\mathrm{d}R^2}{\mathrm{d}t^2}$一定$\neq0$，宇宙要么膨胀，要么收缩，不可能静止下来，爱因斯坦出于“宇宙和谐”的信念，在描述有限无界模型的场方程中加了一个因子 Λ，并用 $\rho+\Lambda/8\pi G$ 代替 ρ 使上述基本方程变为

$$k=\frac{R^2}{c^2}\left(\frac{8\pi G\rho+\Lambda}{3}-H^2\right)$$

于是有

$$\frac{\mathrm{d}^2R}{\mathrm{d}t^2}=-\frac{4}{3}\pi G\rho R-\frac{1}{6}\Lambda R$$

当宇宙物质平均密度 $\rho\neq0$ 时，宇宙膨胀的加速度$\frac{\mathrm{d}R^2}{\mathrm{d}t^2}$可以为 0。这个 Λ 就是著名的、相当于万有斥力的常数项——宇宙项 Λ。

不难推导

$$1=\frac{8\pi G\rho}{3H^2}+\frac{\Lambda}{3H^2}-\frac{kc^2}{H^2R^2}$$

注意到临界密度 $\rho_c=\frac{3H^2}{8\pi G}$，则有$\frac{8\pi G\rho}{3H^2}=\frac{\rho}{\rho_c}=\Omega_m$，令 $\Omega_\Lambda=\frac{\Lambda}{3H^2}$，$\Omega_k=-\frac{kc^2}{R^2H^2}$

可得

$$\Omega_m+\Omega_\Lambda+\Omega_k=1$$

式中，Ω_m 是由质量 m 给出的空间物质密度（以临界密度为单位）；Ω_Λ 由斥力引起，斥力来源于暗能量，所以称 Ω_Λ 为暗能量密度；Ω_k 取决于宇宙的曲率，称为空间曲率参数。k 只能取 0，-1，$+1$ 三种可能的值，于是我们可以列出表 12.8.1 所示三种不同的情况。

表 12.8.1　k 取 0、-1、$+1$ 时的未来宇宙情况

k	Ω_k	$\Omega_m+\Omega_\Lambda$	宇宙未来
0	$=0$	$=1$	平坦
-1	>0	<1	开
$+1$	<0	>1	闭

如果宇宙项 Λ 不存在，$\Omega_\Lambda=0$，那么决定宇宙开闭的只有 Ω_m 的作用：$\Omega_m<1$，说明宇宙物质平均密度小于临界密度，宇宙是开的；如果 $\Omega_m>1$，说明宇宙物质平均密度大于临界密度，宇宙是闭的。如果 $\Lambda\neq0$，那么决定宇宙开闭的不仅是物质平均密度的作用，还需考虑到暗能量的作用。前者代表引力，后者代表斥力，两者的作用是相反的。

关于宇宙斥力的大小可以这样来估计：设均匀宇宙中一个半径为 R 的球状区域，球面上一个质量为 m 的物体所受到的球内物质的引力为

$$f_g=G\frac{Mm}{R^2}$$

球内物质的总质量 $M=\frac{4}{3}\pi R^3\rho$，ρ 是平均密度。于是有

$$f_g = \frac{4}{3}\pi G\rho Rm$$

认为物体受到的斥力 f_r 也与 Rm 成正比

$$f_r = -KRm$$

为了估计比例常数 K 值的大小，设想物体处于整体宇宙甚远处，它所受到的斥力与引力相平衡，即 $f_g = f_r$，或 $K = \frac{4}{3}\pi G\rho$，取 $\rho = \rho_c = 9\times10^{-30}$ 克/厘米^3，可算出

$$K = 2.51 \times 10^{-36}\ 秒^{-2}$$

计及斥力的作用，万有引力公式应改写为

$$f = \left(\frac{GM}{R^2} - KR\right)m$$

引力与斥力大小之比为$\frac{GM}{KR^3}$，尺度越小，斥力越不显著。在地球表面，物体受到的斥力比引力小 30 个量级；在地球公转轨道上，斥力比引力小 22 个量级。当尺度大到宇宙尺度的时候，斥力的作用就不可忽视了。

1990 年开始，天文学家通过 Ia 型超新星验证哈勃公式：距离与退行速度成正比。Ia 型超新星是宇宙中的标准光源，光极大时的亮度是固定的（参见 5.6.3 小节和 9.3.6 小节）。由于望远镜口径的加大，测光技术的灵敏度和精确度的提高，大大延伸了发现 Ia 型超新星的距离。而且由于亮度极高，在很远的地方都能被观测到。还发现 Ia 型超新星的一些谱线如 SiⅡ、CaⅡ的谱线强度与光极大时的亮度相关，即使发现时已经错过了光极大的时机，也能判断它的绝对亮度。通过 Ia 型超新星测距，成为独立于用红移和哈勃关系测距之外的重要方法。光盘图 12.8.20 是两张哈勃望远镜的深空照片（光盘图 12.8.20　大熊座 Ia 型超新星），1995（左）与 2002（右）相比较，箭头所指是新出现的 Ia 型超新星。1998 年公布的结果，几十颗遥远星系里的 Ia 型超新星表现出距离不再与退行速度成正比。退行速度比正比速度减慢了，而且愈远的减慢愈多（图 12.8.21）。距离愈远说明事件发生的年代愈古老。古代的退行速度比现代慢，表明宇宙是加速膨胀的。

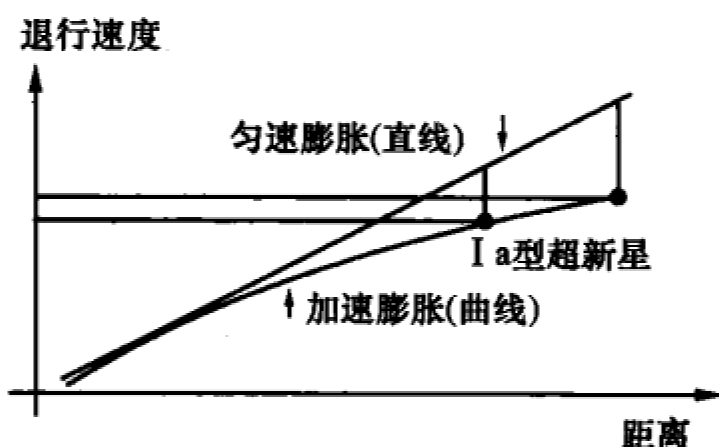


图 12.8.21　Ia 型超新星退行速度减慢

这一结果曾荣登 1998 年美国《科学》周刊十大成果之首。2000 年公布的 18 颗遥远的 Ia 型超新星观测报告，2002 年公布的 16 颗遥远的 Ia 型超新星观测报告，都验证了同样的结果。加速膨胀可以用宇宙斥力来解释。宇宙斥力自然就和暗能量联系在一起了。“山重水复疑无路，柳暗花明又一村。”（南宋·陆游·游山西村）人们猜测之中的那占宇宙 73％的密度（即暗能量），被加速膨胀的天文观测捉住了存在的证据。爱因斯坦的宇宙项真的加对了。加速膨胀导致“开宇

宙”这边的筹码大大增加，人类的未来也许不是热死而是冻死了。

6.3节曾经提到：如果宇宙一直减速膨胀，“特征膨胀年龄”$1/H_0$（或称哈勃年龄）将大于宇宙真实年龄；如果宇宙一直加速膨胀，“特征膨胀年龄”$1/H_0$将小于宇宙真实年龄。从哈勃常数确定宇宙真实年龄的关键在于确切了解哈勃常数H随时间变化的情况，宇宙膨胀何时加速、何时减速的真实过程。然而这是一个十分复杂的问题。当我们观测遥远星系的红移和距离的时候，所依据的电磁波信号是它们很久以前发出的，并不代表现在的膨胀速度。把许许多多既古老又各不相同的时代传来的信息，归算为现代的哈勃常数H_0，以及不同历史时期的H值，要把宇宙演化的动力学过程完整地考虑进去，这当然是非常复杂的（详见12.8.4小节）。

有趣的是，当前精确宇宙学给出的数据，宇宙真实年龄（137.2±1.2）亿年，与$H_0=70.5\pm1.3$的倒数$1/H_0=138.7$亿年不谋而合。但这并不意味着宇宙真实年龄是从哈勃常数取倒数计算而来，它是用独立于哈勃常数的别的方法得到的。两者的相合，可以理解为哈勃常数从古到今的变化，即宇宙开始减速、后来又加速膨胀的过程，平均起来，刚好与现在的膨胀速度相当，使得137.2与138.7巧合相近。这种巧合是否暗含某种玄机，现在还说不清楚。

宇宙未来归宿的问题并没有圆满作答：理论物理计算出的宇宙真空能量比WMAP测出的暗能量大几十个甚至上百个量级，这也太离谱了。暗能量是否另有来由呢？有人想到，古希腊时代亚里士多德认为的宇宙本源：水、土、气、火之外，还有第五要素“精质”（quintessence)，或者现代物理学家所谓的“幻影能量”（phantom）……暗能量到底是什么？人们又一次陷入迷茫之中。正如美国物理学家温伯格所说：“物理学并不是一个已完成的逻辑体系。相反，它每时每刻都存在着一些观念上的巨大混乱。”“暗能量”是人们目前无法得知其究竟为何物而姑且取的名子，不能简单、狭义地理解为“看不见的能量”。等待未来真的“柳暗花明”时，也许会将其正名为更恰当的称呼。未来数年，天文学家准备发射更高级的探测器（见7.5节），对加速膨胀、暗物质、暗能量进一步全面探测，希望求得更深刻的认识。

新世纪刚刚开始，宇宙探索已经迈出重要的几步。暗物质和暗能量这两朵乌云也许会像100年前的那两朵乌云一样酝酿出新的狂飙，把人类认识宇宙、认识自然的能力推向一个更新的高度。

12.8.4 红移与距离的关系

简洁的哈勃定律公式$V=HD$包含着很深刻的内容。退行速度V其实并不是星系退行运动产生的，而是空间膨胀的结果。V的值是通过谱线的红移测量出来的，并且确认谱线红移系缘自多普勒效应。在狭义相对论的框架下，V的计算公

式是（见 6.3 节）

$$V = C\frac{(z+1)^2-1}{(z+1)^2+1}$$

式中，z 称为红移量，是谱线波长的改变量与波长之比。D 是被测量的星系的距离，H 是比例常数——哈勃常数。一个重要问题是：哈勃常数 H 仅在空间上保持常数，而在时间上并不保持常数。详细的叙述是：在同一物理时刻，空间各处的膨胀速度与距离成正比，H 值是常数；不同的物理时刻，H 值是不同的，H 值应表达为时间的函数：$H=H(t)$。在 6.3 节中还提到，$1/H$ 代表宇宙的（特征膨胀）年龄，在宇宙的不同年龄阶段，H 值当然有所不同。一般用 H_0 表示当代的哈勃常数，$1/H_0$ 代表当代的宇宙特征膨胀年龄。

在一个不断膨胀的宇宙中，当应用哈勃公式，或具体地通过接受天体的辐射而测量该天体的红移和距离的时候，我们要小心追问：所测的距离是天体发出辐射时的距离呢？还是我们接受到辐射时，它的距离呢？相应的哈勃常数值 H_0，是天体发出辐射时的 H 值呢？还是我们接受到辐射时的 H 值呢？按照约定，应当是后者。从实测数据到我们约定的距离值以及导出 H_0，需要复杂的归算。此外，严格地说，所谓距离不是平直的欧氏空间中的“直线”距离，而是 12.7.2 节中所说，用度规表示的“流形距离”。严格的化算红移与距离的关系以及导出 H_0，从概念到具体的公式推导，其繁难程度都超出了本书的范围。

下面只给出一些初步的引导。

考虑哈勃常数是时间的函数，哈勃定理写为

$$V = \frac{dR}{dt} = H(t)R$$

由

$$H(t) = \frac{1}{R}\frac{dR}{dt}$$

可知

$$\frac{dH(t)}{dt} = \frac{1}{R}\frac{d^2R}{dt^2} - \frac{1}{R^2}\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 = \frac{1}{R}\frac{d^2R}{dt^2} - H^2(t)$$

令

$$q = -R\left(\frac{dR}{dt}\right)^{-2}\frac{d^2R}{dt^2}$$

有

$$\frac{d^2R}{dt^2} = -\frac{q}{R}\left(\frac{dR}{dt}\right)^2$$

可得

$$\frac{dH(t)}{dt} = -\frac{q}{R^2}\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 - H^2(t) = -H^2(t)(1+q)$$

这就是哈勃常数随时间变化的函数表达式。q 称为宇宙膨胀的加速度因子，或称“减速因

子”。如果宇宙一直匀速膨胀，$\frac{dR}{dt}$=常数，则 $q=0$。在宇宙并非永远匀速膨胀的情况下，q 应当也是时间的函数，当代的 q 值记为 q_0。q_0 的值是观测宇宙学当中重要的物理参量之一。从上述表达式看来，似乎可以通过测定哈勃常数的变化而获得 q_0，但是，既然哈勃常数值本身都很难准确测定，更何况它的变化了。q_0 值经常使用统计红移-视星等关系或星系计数等方法来测定，但往往各种测量结果相差甚远，无法肯定。通常取 q_0 值为 1/2 左右。

通过红移的测定，应用哈勃定理计算距离，在距离不是很遥远（$z<0.3$）的情况下，可以不考虑哈勃常数随时间的变化，而直接使用公式

$$D=\frac{V}{H_0}=\frac{C}{H_0}\frac{(z+1)^2-1}{(z+1)^2+1}$$

对于红移量较大的天体，距离的计算就相当复杂了。《观测宇宙学》（何香涛，2002）给出的公式为

$$D=\frac{C}{H_0q_0^2(1+z)}\{zq_0+(q_0-1)[-1+(2q_0z+1)^{\frac{1}{2}}]\}$$

在实际的天文观测中，测量距离最常用方法是光度法（包括造父变星法和 $\mathrm{I_a}$ 型超新星法），即比较天体的绝对星等和视星等来测定距离，这样测出的距离称为光度距离。对于遥远的星系，较大的红移减弱了它的光度；视星等变暗以为是距离遥远，其真实距离应当稍近一些。故测出的光度距离 D_L 应除以 $(1+z)$ 才是真实距离：$D=D_L/(1+z)$，或 $D_L=D(1+z)$。对于角直径距离 D_A，天体因为远去而产生红移，实测出的是它当年的距离，故现在的真实距离应当稍远一些，应加乘以 $(1+z)$ 的改正：$D=D_A(1+z)$，或 $D_A=D/(1+z)$。对于自行距离 D_P，不受红移影响，故 $D_P=D$（三种测量距离的方法见 6.4 节）。

《星系天文学》（宾尼，梅里菲尔德，2004）给出了光度距离的计算公式

$$D_L=\frac{Cz}{H_0}\left[1+\frac{z(1-q_0)}{(1+2q_0z)^{1/2}+1+q_0z}\right]$$

如果将此式方括弧内的分式上下都乘以因子 $[(1+2q_0z)^{1/2}-(1+q_0z)]$ 即可化算为

$$D_L=\frac{C}{H_0q_0^2}[q_0z+(q_0-1)]\{-1+(2q_0z+1)^{1/2}\}=(1+z)D$$

与《观测宇宙学》（何香涛，2002）中公式是完全一致的。

距离的计算涉及 H_0 和 q_0 的取值，而 q_0 值又与空间物质密度 Ω_m、暗能量密度 Ω_Λ、宇宙曲率参数 Ω_k 的取值有关，依照的宇宙模型不同，便会有不同的结果。所以一些观测宇宙学家的论文或报告里，只给出实际测出的红移量，而把距离的计算留给理论宇宙学家去完成。有些时候只通过简单的公式

$$D=\frac{V}{H_0}=\frac{C}{H_0}\frac{(z+1)^2-1}{(z+1)^2+1}$$

作概略的计算。

12.8.5 斯优尼亚耶夫-泽尔多维奇效应

苏联天文学家斯优尼亚耶夫（R. A. Sunyaev，Р. А. Сюняев）和泽尔多维奇（Y. B. Zeldovich，Я. Б. Зельдович）1972 年指出一种效应：当宇宙背景辐射的光

子在传输过程中，遇到热电子时会产生散射；波长短的部分增强，波长长的部分减弱，被称为 SZ 效应。到 1980 年代以后，开始用 SZ 效应测量遥远天体的距离。斯优尼亚耶夫-泽尔多维奇认为，一些拥有大量热电子气体的星系团所在区域，宇宙背景辐射通过时，强度分布会发生改变，改变的规模和程度与热电子气体区域的厚度有关。使用高精度的大型地面毫米波和亚毫米波望远镜以及宇宙背景辐射空间探测器，测量星系团所在区域的宇宙背景辐射强度变化的情况，SZ 效应就会告诉我们星系团热气体的空间厚度。设若星系团热气体的空间分布是球形的，厚度与线直径相等。通过 X 射线的成像观测获得热气体分布的角直径，那么，星系团的距离就立即知道了，因为天体的线直径与角直径之比就是距离。

这是完全不依赖哈勃常数而直接测量遥远天体距离的方法，反过来将测到的距离值与它的红移量相对照，可以验证哈勃常数的值。COBE 卫星和 WMAP 宇宙背景辐射探测器正是通过这一方法来独立测定哈勃常数的。后发座星系团是距离较近（约 3.7 亿光年）的规则星系团，对它的距离等参数掌握得比较清楚。COBE 和 WMAP 都对后发座星系团作过仔细的观测，来验证 SZ 效应方法的可靠性。唯一对 SZ 效应方法置疑的地方是星系团热气体的空间分布是否都为球形。如果空间分布不是球形，而是椭球或其他形状，则会因为对地球指向的不同而产生测量误差。不过，如果观测样本足够大的话，各种随机的指向将在取平均值时得到误差的补偿。迄今为止，COBE 和 WMAP 应用 SZ 效应方法测出的哈勃常数值拥有比别的方法更高的精度。

12.9　对称与破缺，奇点问题

对称性是 20 世纪末物理学中最重要的中心思想之一。在麦克斯韦的方程组中，已经蕴含着两个麦克斯韦本人还没有意识到的对称性，其中一个由爱因斯坦的狭义相对论揭示出来，另一个规范对称性直到 20 世纪 70 年代，量子力学的深入发展才把它挖掘出来并逐渐深刻地显示出它的重要意义及其对宇宙结构的影响。在现代物理学的其他领域，如粒子物理、固体物理中，对称性的概念也都是一个非常深刻的问题，描述对称性的数学语言是“群论”。进一步地介绍已超出本书的讨论范围。

根据对称性原则，在宇宙早期的高温高密状态下，物质粒子由光子碰撞而产生出来的时候，正、反粒子数一直保持严格相等，当宇宙温度下降到 10 亿开时，它们将全部成对湮灭掉，不会有任何粒子留存下来，那就不会有今日的物质世界。为了在粒子和反粒子湮灭之后，还有点东西剩下来留作今日的宇宙物质，在宇宙创生之初，物质粒子必然要比反物质粒子多一点，电子必然要比正电子多一点，质子必然要比反质子多一点，中子也必然要比反中子多一点，这就是重子或

其他粒子的不对称性，属于“对称的破缺”。

现代天体物理学测定的结果，今日宇宙中的光子数与重子数之比约为10亿∶1。根据粒子物理学中的重子数及轻子数各自守恒的原则，宇宙创生初期，湮灭过程结束之后，光子数与重子数之比也应当是这个比例；而根据能量⇔物质创生和湮灭的平衡原则，光子数与粒子数本来是一样多的，是湮灭造成了粒子数的减少。这样便可推论出：由能量产生出的正、反粒子，归于湮灭的部分与剩余下来的部分之比也是10亿∶1。也就是说，每10亿对正、反粒子（质子、中子、电子）湮灭掉之后，剩余下一个正粒子，正是它们组合、演化为今日的物质世界。在这里，量子力学的对称性原则，出现了非常微小的不对称情形，理论物理学家们称其为对称性的破缺。美籍中国物理学家杨振宁和李政道于1956年最先指出的宇称不守恒现象是对称与破缺的一个实例。他们获得了1957年诺贝尔物理学奖。另一位美籍中国物理学家吴健雄通过实验证明了他们的结论。吴健雄获得1978年首届沃尔夫奖。人们猜想在宇宙创生之初，本来是没有破缺的，在宇宙极早期一定存在着一种现代物理学家还不能道出的过程，造成了上述微小的破缺，这个过程出现在10^{-36}秒以前的大统一时代。遗憾的是，那个时代的宇宙能量标度为10^{15}吉电子伏特，而目前人类最高水平的粒子加速器——美国布鲁克海文实验室的相对论性重离子对撞机和2008年建成的欧洲粒子物理研究中心大型强子对撞机LHC（光盘图12.9.1 大型强子对撞机LHC）只能达到2×10^4吉电子伏特的能量，相差11个数量级。通过实验直接观察产生破缺的过程是不可能的。然而宇宙自身演化的历史告诉我们，破缺应当存在。对称性与破缺并存才创就了今日斑斓的宇宙。

神秘而和谐的大自然自身的美，与人类心灵深处的美是相通的：

对称性＋破缺＝美

这条人文科学美学中的原则，居然在宇宙创生极早期的过程中也被体现出来，而那时人类还远没有诞生，这真是不可思议的。

2008年诺贝尔物理学奖授予了美国芝加哥大学费米实验室名誉教授南部阳一郎（美籍日裔，87岁）、日本筑波高能加速器研究机构名誉教授小林诚（64岁）和日本京都大学汤川理论物理研究所名誉教授益川敏英（68岁）。他们的成就是发现了亚原子物理学中自发对称性破缺机制及有关对称性破缺起源的研究。这项研究为解开宇宙创生时的对称性破缺谜团提供了线索。

暴胀模型也许已经成功地解释了10^{-36}秒以后至0.000 1秒的宇宙演化进程，但在10^{-36}秒以前，难度就更大了。特别是在10^{-44}秒时，宇宙温度达到10^{32}开，引力与已经大统一的三种作用不能相区别。这里又有一道更加厚重、更加严实的帷幕，挡住了它后面的神秘场景。如果说先前那道帷幕已被掀开一角，人们发现了暴胀模型，那么现在这道帷幕掩藏的是真正的宇宙起源的秘密，当代科学家们

至今也无力掀开它的哪怕一丝丝缝隙。我们完全看不见宇宙这最初的 10^{-44} 秒究竟是怎样的，其中掩藏着的最疑难的问题就是奇点问题。奇点，$t=0$，视界和宇宙体积都等于 0，温度和密度都是无限大。标准大爆炸宇宙模型，包括暴胀宇宙模型都不能解释奇点问题。奇点问题是人类文明辛苦积累起来的物理概念所不能接受的。

同黑洞中的奇点一样，彭罗斯和霍金已经严格证明了，奇点是广义相对论的必然推论。10.9 节讲述黑洞的困难时，已经提到过彭罗斯和霍金的证明，以及排除黑洞奇点困难的理论前景是尚未形成的“量子引力理论”。宇宙创生的奇点问题在这一点上同黑洞内部的奇点问题是一样的，但后者只是宇宙中的一个局部，而前者则是宇宙整体。

“量子引力理论”面对的是宇宙 10^{-44} 秒以前，时间尺度 t 和空间尺度 l 都处于普朗克尺度范围：$t_p=5.390\,8\times10^{-44}$ 秒，$l_p=1.616\,1\times10^{-35}$ 米之内的情景。时空处于不连续状态，或者说引力和时空本身都已经量子化。有意义的连续时空是从图 12.7.3 中第一道横线 10^{-44} 秒以后才创生的。在此之前，引力不能区别于任何其他作用，或者说引力还没有单独形成，不存在有意义的连续时空。既然如此，那么关于引力与时空的基本理论广义相对论当然也就无用武之地了。由广义相对论推理出来的奇点问题岂不应当另作别论了吗？有人说，奇点不属于时空，奇点在时空之外。那么，它又是什么呢？物理学家和宇宙学家们目前并没有从困扰中解脱出来，因为量子引力理论至今还没有形成。20 世纪 80 年代以来，已经提出了一些有价值的思想，如“弯曲空间中的量子场论”、“非线性量子力学”、“超引力理论”、“膜理论”、“超弦理论”等。这些从不同角度进行的深入研究，也许在本世纪或下一个世纪里将汇聚成 20 世纪物理学最重要的两大理论——引力理论与量子理论的统一体——量子引力理论。到那时，宇宙创生的前 10^{-44} 秒以及关于宇宙起源的所有疑难问题都可能迎刃而解。人类认识宇宙的前景既面临挑战又无限光明。

对于闭宇宙而言，宇宙回缩到最后 10^{-44} 秒的情景同宇宙创生之初的前 10^{-44} 秒的情景同样令物理学家们困扰。当宇宙回缩到时空都接近消失的时候，厚重的帷幕又无情地降落下来，不留一丝缝隙。关于宇宙奇点的故事又要重演一遍了，但这一次的时间箭头颠倒了方向。

即便如此，无论宇宙的开闭我们总可以从逻辑上划定一个时间的起点或终点，在那个时刻之前或之后，时间本身是没有意义的，原则上不能再追溯任何因果关系，根本不存在“之前”和“之后”。现代热物理学的发展使我们毫无困难地接受一个绝对零度的概念。因为在那个温度（−273.16℃）以下，温度本身是没有意义的。温度是所有粒子无规则运动的平均动能，如果所有粒子都静止不动了，温度当然也就没有意义了。不可能存在一种比完全没有热的状态更冷的状

态。鉴于此，我们为什么不能接受一个绝对零时的概念呢？与温度的绝对零度情形一样，在时间绝对零时以前，时间没有意义，不存在任何因果关系。人类任何用于计量时间的依据都是运动着的事物。如果连所有这种事物都已荡然无存，“时间仍在流逝”的观念又从何说起呢？当然，限于目前的知识水平，绝对零时的概念不像绝对零度的概念那么成熟，还存在一些解答不了的疑问；尽管当代宇宙学家几乎已经肯定：空间是否有限还不能明确回答，但时间有起点应当是必然的。

在宇宙加速膨胀被发现以前，有一种说法提供一条思路，那就是无限循环宇宙理论：我们现在的宇宙是闭宇宙，但这个闭宇宙的未来正是另一个闭宇宙的当初。宇宙从来就没有真正达到过无限大密度的状态，宇宙现在的膨胀可能开始于先前一次收缩的末尾。宇宙像一条首尾相接的蛇。图 12.9.2 本来是描述宏观与微观首尾相接的，这里借用来描述无限循环宇宙。永无休止地膨胀与收缩往复循环，一直伸展到无穷无尽的过去和未来，没有任何开端，也不会有任何结尾。这种说法巧妙地回避了“奇点”的问题。然而另一个严重的理论困难却横亘于前：

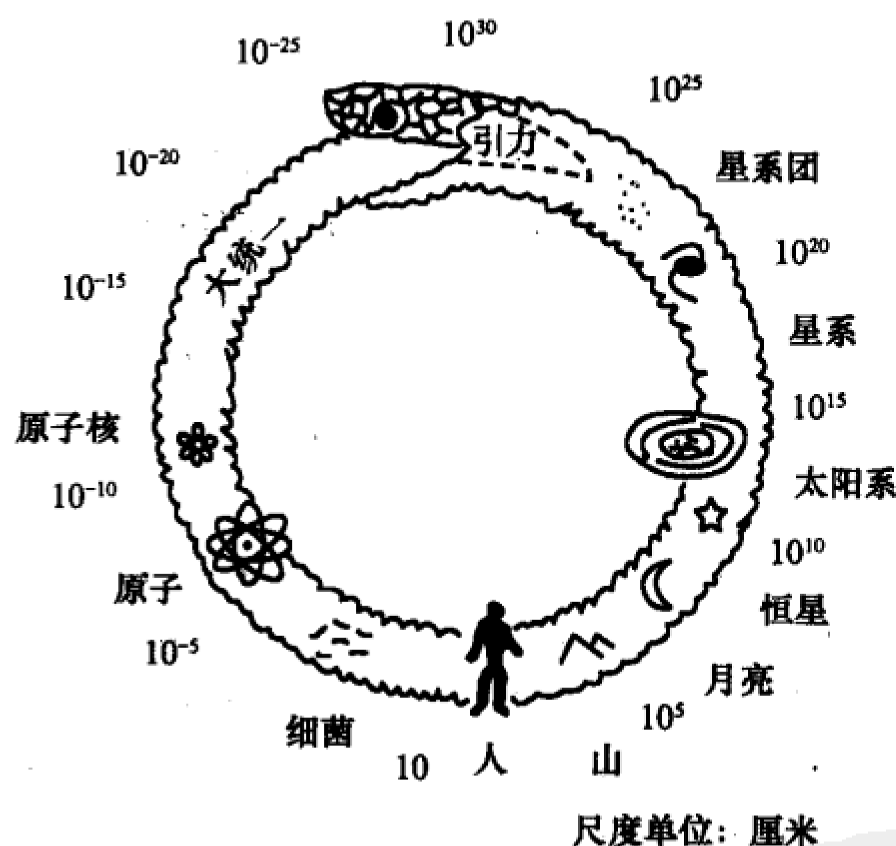


图 12.9.2 宇宙像一条首尾相接的蛇

一个处于极高密度状态的塌缩宇宙又转而出现反弹，把原来暴缩的巨大动量，反转过来变为暴胀，是什么物理机制能使之变成现实？每一次宇宙的塌缩和膨胀循环都会有一些能量的损耗，同物理学上的任何循环过程一样。宇宙塌缩、膨胀的循环应当因损耗而导致核子数与光子数的比值稍有减少。如果这种循环在今日宇宙之前已经进行了无限多次，那么这个比数应减少到零，显然不符合今日宇宙的现实；如果循环只有有限次，那么必然有排在最前面的“第一次”，对这第一次而言，一切不可回避的疑难问题又都蜂拥而至了。这种无限循环的振荡型宇宙理

论，虽然美好，却不能真正解决问题；而且这种模型似乎仍带有绝对时空观念的影子，可能为哲学思辨所钟爱，却并不比“一次性”宇宙更容易为物理理论所接纳。

这种理论使人们想起佛教教义中关于人世轮回的说法：一个人死了，转世为另一个完全不相干的人或动物。投胎以后的新人由于在黄泉路上喝过一碗“孟婆汤”而对他的前世毫无记忆。那么，在哪种意义上人们可以说，这个再投胎的人与另一个截然不同的人或动物为同一个“人”呢？在人世问题上，没有佛教信仰的人宁愿相信“人固有一死”，“生命于人只有一次而已”；同样在对宇宙演化的认识问题上，一个有时间起点的宇宙为什么不能被接受呢？持谨慎态度的天文学家们，为了与哲学上的“无限宇宙”相区别，常常称他们所研究的宇宙为“可观测的宇宙”。那么，既然无论从时间含义还是从空间含义而言，另外一些“不可观测”的宇宙，意味着没有任何信息与我们相沟通，它对我们还有什么意义呢？即使我们这个宇宙之外，或者我们这个宇宙消亡以后，仍存在别的宇宙，而它们对我们来说又是不可观测的，那么，它们在物理性质上是同我们的宇宙完全断开的，“我们的”宇宙仍然只有一次而已。

从暴胀理论对宇宙平直性疑难的解释，现实宇宙的物质平均密度应当接近理论上的临界密度，但到底略大于还是略小于临界密度，仍然决定着宇宙的开闭。最新的 WMPS 观测结果似乎已经显示出：现实宇宙的物质平均密度中亮物质与暗物质的总和只占 27.4%；余下的 72.6%属暗能量，不仅不能有助于宇宙的闭合，反而令它加速膨胀。开宇宙似乎已成定局，无限循环的震荡型宇宙更没有立论依据了。但正如温伯格所说，我们还“存在着一些观念上的巨大混乱。”离最后定论还相当遥远。

1981 年，在梵蒂冈举行的宇宙学会议上，霍金提出另一种让宇宙在时间和空间上都无始无终的思想，但他申明这仅仅是一种猜想。他说，为宇宙求解的边界条件是“它没有边界”。如同地球的两极是地理纬度值的终极之点，没有比北极更“北”的地方，也没有比南极更“南”的地方。但北极和南极并不是球面上的奇点，它们和其他的地方仍然是连续延伸而且没有尽头的。同样，宇宙大爆炸的伊始是我们度量时间和空间的起点，也许并不代表时间和空间的尽头。当然，霍金的猜想并没有真正解决问题，在“量子引力理论”问世之前还很难形成结论。已于 2005 年 4 月 2 日离开人世的前罗马天主教皇约翰·保罗二世（John Paul Ⅱ）在接见这次会议代表时宣称，支持科学家们研究宇宙创生之后的演化过程，但宇宙创生的时间奇点难题属于宗教而不是科学的范畴，因为那是上帝的工作。

宇宙模型理论中最说不清的问题仍然是奇点问题。更具体地说，那些最早的能量，那些光子最早是从哪里来的？《最初三分钟》的作者温伯格也说：“我不能

否认，在我写到最初三分钟的事情时，似乎是充满信心，但心里并不是那么踏实”。美国著名的物理学家奥本海默也说过：“当我们初窥宇宙奥秘的时候，心中有一种畏惧感，好像那是凡人所不应该获知的奥秘”。然而中国的先哲，约 2500 年前的老子却毫不含糊地说过：“天下万物生于有，有生于无”。“有生于无”是对我们上述难题的简单明了的回答。苏联天体物理学家林德（A. D. Linde）1982 年说过：“宇宙创生于无的可能性，是非常有兴趣的，应当进一步加以研究”。“有生于无”不能理解为过去没有宇宙，后来产生了宇宙。这种说法的错误是暗含地认为时间是可以在宇宙之外的，所谓“过去”一词本身就意味着已经有了时间，而不是真正的无。没有时间就没有过去、现在、将来这些概念。时间起源于没有时间的状态，空间起源于没有空间的状态。没有时间、没有空间就是“无”，有了时间和空间就是“有”，后来的“有”起源于当初的“无”，这也许就是“有生于无”的精义。当然，我们现在无法考证，2 500 年前的中国古人在竹简上刻下这四个象形文字的时候，他究竟是怎样想的；但是，我们今天可以用这四个字来理解宇宙创生的一些疑难问题。美国当代宇宙学家索恩说得好：“人类独具的那令人惊奇的思维的力量——在迷途中知返，在进取时跳跃——最终从宇宙的纷繁复杂中发现，主宰宇宙的基本定律竟是那样的单纯、简洁和壮丽。”

在结束本章，也是结束全书的时候，让我们引用一句爱因斯坦的名言，那就是：

“宇宙中最不可理解的事，是宇宙是可以理解的”。

The most incomprehensible thing about the Universe is that it is comprehensible.

——Albert Einstein



参考书目

爱因斯坦. 1957. 爱因斯坦文集. 许良英等译. 北京：商务印书馆
宾尼，梅里菲尔德. 2004. 星系天文学. 赵刚等译. 北京：中国科学技术出版社
崔振华等. 1995. 天文博物馆. 郑州：河南教育出版社
戴维斯. 1997. 宇宙的最后三分钟. 傅承启译. 上海：上海科学技术出版社
方励之等. 1988. 宇宙的创生. 北京：科学出版社
何香涛. 2002. 观测宇宙学. 北京：科学出版社
胡中为. 2003. 普通天文学. 南京：南京大学出版社
胡中为等. 1998. 行星科学导论. 南京：南京大学出版社
胡中为等. 2003. 天文学教程（上册）. 第2版. 北京：高等教育出版社
基彭哈恩. 1996. 千亿个太阳. 沈良照，黄润乾译. 长沙：湖南科学技术出版社
卡夫曼. 1985. 星系和类星体. 何妙福等译. 北京：科学出版社
卡夫曼. 1988. 恒星和星云. 马星恒，杨健译. 北京：科学出版社
李启斌等. 1996. 90年代天体物理学. 北京：高等教育出版社
林元章. 2000. 太阳物理导论. 北京：科学出版社
刘学富等. 2004. 基础天文学. 北京：高等教育出版社
卢米涅. 1997. 黑洞. 卢炬甫译. 长沙：湖南科学技术出版社
陆埮. 1996. 宇宙. 长沙：湖南教育出版社
聂清香等. 1996. 天文学基础. 北京：中国人事出版社
温伯格. 1981. 最初三分钟. 北京：科学出版社
宣焕灿. 1992. 天文学史. 北京：高等教育出版社
叶叔华. 1986. 简明天文学辞典. 上海：上海辞书出版社
中国大百科全书总编辑委员会. 1980. 中国大百科全书. 天文学. 北京：中国大百科全书出版社
周体健. 1990. 简明天文学. 北京：高等教育出版社
朱慈墭. 2003. 天文学教程（下册）. 第2版. 北京：高等教育出版社

附　　录

附录 1　最亮的 21 颗恒星

(视星等亮于 $1^{m}.5$)

星名		视星等	绝对星等	光谱型	自行 /(1″/年)	距离* /光年	视向速度 /(千米/秒)	赤经 j2000	赤纬 j2000
中名	西名								
天狼 (大犬 α)	Sirius (α CMa)	$-1^{m}.46$	$+1^{m}.41$	A1	1.324	8.6	−8	$6^{h}45^{m}.2$	−16°43′
老人 (船底 α)	Canopus (α Car)	−0.72	−4.7	F0	0.025	300	+21	$6^{h}24^{m}.0$	−52°42′
南门二 (半人马 α)	Rigil Kent (α Cen)	−0.27	+4.3	G2	3.675	4.39	−24	$14^{h}39^{m}.5$	−60°50′
大角 (牧夫 α)	Arcturus (α Boo)	−0.04	−0.2	K2	2.285	36.7	−5	$14^{h}15^{m}.6$	+19°11′
织女一 (天琴 α)	Vega (α Lyr)	0.03	+0.5	A0	0.345	25.3	−14	$18^{h}36^{m}.9$	+38°47′
五车二 (御夫 α)	Capella (α Aur)	0.08	−0.6	G8	0.436	42	+30	$5^{h}16^{m}.7$	+46°0′
参宿七 (猎户 β)	Rigel (β Ori)	0.12	−7.0	B8	0.001	770	+21	$5^{h}14^{m}.5$	−8°12′
南河三 (小犬 α)	Procyon (α CMi)	0.38	+2.65	F5	1.248	11.4	−3	$7^{h}30^{m}.3$	+5°14′
参宿四 (猎户 α)	Betelgeuse (α Ori)	0.06～0.75	−6	M2	0.029	430	+21	$5^{h}55^{m}.2$	+7°24′
水委一 (波江 α)	Achemar (α Eri)	0.46	−2.2	B5	0.098	144	+19	$1^{h}37^{m}.7$	−57°14′
马腹一 (半人马 β)	Hadar (β Cen)	0.61	−5.0	B1	0.035	525	−11	$14^{h}03^{m}.8$	−60°22′
河鼓二 (牛郎、天鹰 α)	Altair (α Aql)	0.77	+2.3	A7	0.658	16.8	−26	$19^{h}50^{m}.8$	+8°52′
毕宿五 (金牛 α)	Aldebaran (α Tau)	0.85	−0.7	K5	0.203	65	+54	$4^{h}35^{m}.9$	+16°31′
十字架二 (南十字 α)	Acrux (α Cru)	0.85	−3.5	B2	0.043	320	−7	$12^{h}26^{m}.6$	−63°06′
心宿二 (天蝎 α)	Antares (α Sco)	0.94	−4.7	M1	0.030	600	−3	$16^{h}29^{m}.4$	−26°26′

续表

星名 中名	星名 西名	视星等	绝对星等	光谱型	自行 /(1″/年)	距离* /光年	视向速度 /(千米/秒)	赤经 j2000	赤纬 j2000
角宿一 (室女 α)	Spica (α Vir)	0.98	−3.4	B1	0.052	270	+1	$13^h25^m.2$	−11°10′
北河三 (双子 β)	Pollux (β Gem)	1.14	+0.95	K0	0.625	34	+3	$7^h45^m.3$	+28°02′
北落师门 (南鱼 α)	Fomalhaut (α PsA)	1.16	+1.9	A3	0.367	25	+7	$22^h57^m.6$	−29°37′
天津四 (天鹅 α)	Deneb (α Cyg)	1.25	−7.3	A2	0.003	3 200	−5	$20^h41^m.4$	+45°17′
十字架三 (南十字 β)	Mimosa (β Cru)	1.25	−4.7	B0	0.049	350	+20	$12^h47^m.7$	−59°41′
轩辕十四 (狮子 α)	Regulus (α Leo)	1.35	−0.7	B7	0.253	78	+6	$10^h08^m.4$	+11°58′

* 距离值采用 Hipparcos 卫星数据。

附录 2　天文常数系统

（1984 年启用的 1976 年国际天文学联合会天文常数系统）

1. 定义常数

高斯引力常数　　$k=0.017\,202\,098\,95$

2. 基础常数

光速	$c=299\,792\,458$ 米/秒[①]
天文单位距离的光行时	$\tau_A=499.004\,782$ 秒
地球赤道半径	$a_e=6\,378\,140$ 米
地球力学形状因子	$J_2=108\,263\times10^{-8}$
地心引力常数	$GE=3.986\,005\times10^{14}$ 米^3/秒^2
引力常数	$G=6.672\times10^{-11}$ 米^3/(千克·秒^2)
月球/地球质量比	$\mu=0.012\,300\,02$
黄经总岁差（J2000）	$P=5\,029''.096\,6$（每世纪）
黄赤交角（J2000）	$\varepsilon=23°26'21''.448$
章动常数（J2000）	$N=9''.2\,109$[②]

① 1983 年第 17 届国际计量大会通过以光速为定义常数，而米的新定义为“在真空中 1/299 792 458 秒的时间间隔内光行程的长度”。

② 1979 年第 17 届国际天文学联合会通过，改 N=9″.202 5，列为导出常数，仍自 1984 年启用。

3. 导出常数

天文单位	A=149 597 870 千米
太阳视差	$\pi_{\odot}=8''.794\ 148$
光行差常数（J2000）	$K=20''.495\ 52$
地球扁率因子	$1/f=298.257$
日心引力常数	$GS=132\ 712\ 348\times10^{12}$ 米^3/秒^2
日地质量比	$S/E=332\ 946.0$
太阳质量	$S=19\ 891\times10^{26}$ 千克
日与地月系质量比	$(S/E)/(1+\mu)=328\ 900.5$

4. 行星质量系统（太阳质量与行星质量之比）

水星	6 023 600	火星	3 098 710	天王星	22 869
金星	408 523.5	木星	1 047.355	海王星	19 314
地月系	328 900.5	土星	3 498.5	冥王星	3 000 000

附录 3　天文学常用的物理常数

（2006 年国际 CODATA 推荐值）

万有引力常数	$G=6.674\ 28(67)\times10^{-11}$ 米^3/(千克·秒^2)
普朗克常数	$h=6.626\ 068\ 96\ (33)\times10^{-34}$ 焦·秒
玻尔兹曼常数	$k=1.380\ 650\ 4\ (24)\times10^{-23}$ 焦/开
斯特藩常数	$\sigma=5.670\ 400\ (40)\times10^{-8}$ 瓦/(米^2·开^4)
维恩位移常数	$b=\lambda_{max}T=2.897\ 768\ 5\ (51)\times10^{-3}$ 米·开
中子质量	$m_n=1.674\ 927\ 211\ (84)\times10^{-27}$ 千克
质子质量	$m_p=1.672\ 621\ 637\ (83)\times10^{-27}$ 千克
电子质量	$m_e=9.109\ 382\ 15\ (45)\times10^{-30}$ 千克
电子电荷	$e=1.602\ 176\ 487\ (40)\times10^{-19}$ 库
里德伯常数	$R=10\ 973\ 731.568\ 527\ (73)$ 米$^{-1}$
真空介电常数	$\varepsilon_0=8.854\ 187\ 817\times10^{-12}$ 库^2/(牛·米^2)
阿伏伽德罗常数	$N_0=6.022\ 141\ 79\ (30)\times10^{23}$ 摩尔$^{-1}$

（括号里的数据是最后两位数字的标准误差）

附录 4　角度·时间·距离

$\pi=3.141\ 592\ 653\ 59$

弧度＝57°.295 779 513 1＝206 264″.806

原子时秒＝铯原子^{133}Cs 基态能级跃迁辐射的电磁波振荡 9 192 631 770 周所经历的时间（1958 年 1 月 1 日世界时 0^h 起启用；1975 年开始，协调世界时 UTC 时号秒小数用原子时秒，秒整数以上用平太阳时）

平太阳日＝平太阳连续两次上中天的时间间隔

平太阳赤经 $R_u = A + PT_u + QT_u^2 + RT_u^3$

其中 $A = 18^h41^m50^s.548\ 41$，$P = 8\ 640\ 184^s.812\ 866$，$Q = 0^s.093\ 104$

$R = -6^s.2 \times 10^{-6}$，$T_u =$（JD－2 451 545.0）/36 525

JD 为儒略日（4713 年 *B.C.* 1 月 1 日世界时 12^h 起算的日数）

回归年＝365.242 198 781 平太阳日（以下简称日）（1900.0），365.242 192 64 日（2000.0）

恒星年＝365.256 362 73 日（1900.0），365.256 366 24 日（2000.0）

儒略年＝365.25 日

朔望月＝29.530 588 2 日

恒星月＝27.321 661 40 日

恒星日＝0.997 269 566 日＝$23^h56^m04^s.090\ 5$（平太阳时）

光年＝9.460 553 6×10^{15}米＝63 239.8 天文单位

秒差距＝206 264.806 天文单位＝3.085 678×10^{16}米≈3.26 光年

附录 5　太阳·月球·地球

	太阳
质量	1.989 1×10^{33}克
半径	6.959 9×10^8 米
平均密度	1.409 克/厘米^3
表面有效温度	5 770 开
太阳常数（辐照）	1.367×10^3 瓦/米^2
辐射总功率	3.845×10^{26}瓦
视星等	$-26^m.74$
绝对星等	$+4^m.83$
MK 光谱型	G2V

	月球	地球
质量	7.350×10^{25}克	5.974×10^{27}克
直径	3 476 千米	12 756 千米
平均密度	3.341 克/厘米^3	5.515 克/厘米^3

表面重力加速度	1.62 米/秒^2	9.806 1 米/秒^2
表面脱离速度	2.38 千米/秒	11.2 千米/秒
赤道面与黄道面交角	1°32′	23°26′
白道面与黄道面交角	5°09′	
月球绕地轨道半长径	384 400 千米	
轨道偏心率	0.054 9	

地球分层

高度/千米	名　称	概　况
1 000	磁层	面向太阳一侧距地面 8～10 个地球半径，背向太阳一侧距地面数百个地球半径。保护地球免受太阳风中高能粒子的轰击
50	电离层	大气原子呈电离状态，运动能量很高，但非常稀薄，反射无线电短波，保障地面长途通信
18	平流层	气流稳定，温度随高度上升，臭氧浓度较高，吸收太阳紫外辐射。占大气总质量 19.9%
	对流层	对流运动强烈，决定地面天气状况，温度随高度下降。占大气总质量 80%
0	地壳	岩石圈，厚度不均匀。青藏高原厚 65 千米，深海处厚 5～8 千米，平均厚 35 千米
−35	莫霍洛维奇间断面	
	地幔	超基性岩。密度 3.3～5.6 克/厘米^3，随深度增加。具塑性，可缓慢流动
−2 900	古登堡-维舍特间断面	
	外核	液态。温度和压力随深度增加
−5 000	内核	固态。密度 13 克/厘米^3，温度 5 000 开

附录 6　八大行星表

（据 Wikipedia 开放百科全书 2008 数据）

行星	英文名	轨道半长径/天文单位	至太阳平均距离/百万公里	公转周期	偏心率	轨道面与黄道面倾角/(°)
水星	Mercury	0.387 099	57.909 2	87.9674 日	0.205 631	7.00
金星	Venus	0.723 332	108.208 9	224.6960 日	0.006 773	3.39
地球	Earth	1.000 000	149.597 9	365.2564 日	0.016 710	/
火星	Mars	1.523 662	227.936 6	686.9649 日	0.093 412	1.85
木星	Jupiter	5.203 363	778.412 0	11.862615 年	0.048 393	1.31
土星	Saturn	9.537 070	1 426.725 4	29.447498 年	0.054 151	2.48
天王星	Uranus	19.191 264	2 870.972 2	84.016846 年	0.047 168	0.76
海王星	Neptune	30.068 963	4 498.252 9	164.79132 年	0.008 586	1.77

行星	赤道半径*	质量*	平均密度（克/厘米^3）	表面重力加速度（米/秒^2）	赤道逃逸速度（千米/秒）	表面平均温度（开）	自转周期	赤道与轨道面交角（°）	卫星数
水星	0.382 5	0.055 27	5.43	3.70	4.25	440	58.6462 日	0.0	0
金星	0.948 8	0.815 00	5.24	8.87	10.36	730	243.0187 日	177.3	0
地球	1.000 0	1.000 00	5.515	9.81	11.18	288-293	23.9345 时	23.45	1
火星	0.532 26	0.107 45	3.940	3.71	5.02	186-268	24.6230 时	25.19	2
木星	11.209	317.816 6	1.33	23.12	59.54	152	9.9250 时	3.12	63 有环
土星	9.449	95.160 9	0.70	8.96	35.49	134	10.6562 时	26.73	60 有环
天王星	4.007	14.537 3	1.30	8.69	21.29	76	17.2399 时	97.86	27 有环
海王星	3.883	17.147 1	1.76	11.00	23.71	72	16.1100 时	29.58	13 有环

* 赤道半径：地球＝1；质量：地球＝1.

附录 7 银河系的基本参量

银河系总质量　约 $2\times10^{12}M_\odot$，其中亮物质 $1.8\times10^{11}M_\odot$ 恒星占 90%

银河系年龄　约 10^{10} 年

核球长径　约 4 000～5 000 秒差距，短径约 4 000 秒差距，质量 $7\times10^9M_\odot$

银盘直径　约 30 000 秒差距（10 万光年）

银盘厚度　近核球处约 2 000 秒差距（6 500 光年）

太阳附近约 1 000 秒差距（3 300 光年）

银晕直径　约 90 000 秒差距（30 万光年）

银冕直径　约 20 万秒差距（68 万光年）

太阳距银心距离　约 8 500 秒差距（2.8 万光年），在银道北 12 秒差距（39 光年）处

5 条旋臂　英仙臂，猎户臂，人马臂，南十字臂，矩尺臂；太阳位于猎户臂内侧

太阳处银河系自转速度　约 220 千米/秒，从银道北看顺时针自转；周期 2.7 亿年

太阳系在银道面上下运动周期　约 6 200 万年

银心方向　（2000.0）：$\alpha=17^h45^m.6$，$\delta=-28^\circ56'.2$（人马座）

北银极　（2000.0）：$\alpha=12^h51^m.4$，$\delta=+27^\circ07'.7$（后发座）

脱离速度值　核球 700 千米/秒，太阳附近 360 千米/秒，银河系边缘 240 千米/秒